

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Petteri Haapamäki

Selvitys lähikenttäkuvantamiseen perustuvan sensorijärjestelmän ominaisuuksista sovellusten kannalta

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 9.11.2007

Työn valvoja Professori Raimo Sepponen

Työn ohjaaja Lab.ins. Matti Linnavuo

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

<b>Tekijä:</b>	Petteri Haapamäki	
<b>Työn nimi:</b>	Selvitys lähikenttäkuvantamiseen perustuvan sensorijärjestelmän ominaisuuksista sovellusten kannalta	
<b>Päivämäärä:</b>	9.11.2007	<b>Sivumäärä:</b> 55
<b>Osasto:</b>	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
<b>Professori:</b>	S-66 Sovellettu elektroniikka	
<b>Työn valvoja:</b>	Professori Raimo Sepponen	
<b>Työn ohjaaja:</b>	Lab.ins. Matti Linnavuo	
<p>Väestön nopea ikääntyminen teollisuusmaissa ja erityisesti Suomessa asettaa terveyden- ja vanhustenhoidon järjestelmät valtaviin haasteiden eteen. Samaan aikaan kuin saatavilla olevan työvoiman ja veronmaksajien määrä vähenee kasvaa juuri sen väestöryhmän osuus yhteiskunnassa, joka vaatii eniten terveydenhuollon palveluita</p> <p>Ratkaisua tähän vaikeaan yhtälöön on lähdetty laajalti hakemaan uuden tekniikan tarjoamista mahdollisuuksista, joiden avulla vanhusten asumista omassa kodissa voidaan tukea ja ajallisesti pidentää. Tätä tarvetta silmällä pitäen on kehitetty myös Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratoriossa syntynyt ELSI-järjestelmä.</p> <p>ELSI-järjestelmän avulla voidaan seurata ja paikallistaa henkilöitä kiinteistöissä kuten vanhustenhoitolaitoksissa, sairaaloissa tai yksityisissä kodeissa sekä mitata heidän elintoimintojaan niin kaatumistapauksissa lattialla kuin myös vuoteessa maataessa.</p> <p>Järjestelmä perustuu kapasitiivisiin antureihin, jotka voidaan asentaa esimerkiksi lattiapinnoitteen alle tai vuoteeseen. RFID-toteutus mahdollistaa edelleen havaittujen henkilöiden yksilöimisen. Terveydenhuollon kentän lisäksi tekniikka tarjoaa mahdollisuuksia esimerkiksi myös taloautomaation ja kulunvalvonnan tarpeisiin.</p> <p>Tässä diplomityössä pyrittiin laaja-alaisen katsauksen tekemiseen järjestelmän tämänhetkisistä kehitysvaihtoehdoista painopisteen ollessa antureiden puolella, koska kyseisen osa-alueen analyysi oli ollut aikaisemmin vähäisempää. Lisäksi työhön sisältyi muutamien pilottihankkeissa esiin tulleiden ongelmien käsittelyä ja ratkomista.</p> <p>Tehdyn tutkimuksen pohjalta esitetään ajatuksia niistä kehityssuunnista ja jatkotutkimusvaihtoehdoista, jotka nähtiin potentiaalisesti tehokkaimmiksi järjestelmän ongelmakohtien ratkomisen kannalta.</p>		
<b>Avainsanat:</b> Kapasitiivinen lähikenttäkuvantaminen, ELSI, RFID		

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS

<b>Author:</b>	Petteri Haapamäki
<b>Name of the Thesis:</b>	Disquisition of the properties of the near field imaging based sensor system for different applications
<b>Date:</b>	9.11.2007
	<b>Number of pages:</b> 55
Department of Electrical and Communications Engineering	
Professorship: S-66 Applied Electronics	
<b>Supervisor:</b>	Professor Raimo Sepponen
<b>Instructor:</b>	Lab.Mgr. Matti Linnavuo
<p>The rapid aging of the population in the industrialized countries and especially in Finland brings great challenges to health care and elderly care systems. In the same time than available labor force declines in the society grows the amount of people which needs most health care services.</p> <p>There have been increasing tendency to look the solution for this difficult equation from the possibilities provided by the new technologies, which enable the elderly people to live longer in their own homes. An ELSI system, which have been developed in Applied electronics laboratory in Helsinki University of Technology, is also dedicated for this matter.</p> <p>The ELSI system can be used to monitor people in buildings like old-age homes, hospitals and private homes and also to measure vital signs of persons in falling cases and in beds.</p> <p>The system is based on capacitive sensors, which can be installed under a floor surface or in beds. A RFID feature makes it also possible to identify persons detected by the sensors. In addition to the field of health care services the system can also provide new possibilities to building automation and access control.</p> <p>The aim of this master's thesis was to make an extensive look for systems developing possibilities. Focus was decided to be in features of the sensors and thesis also includes some solution suggestions to problems which have arisen during the use of the system. Based on the conducted research there is also suggestions made for the systems future development.</p>	
<b>Keywords:</b> Capacitive Near Field Imaging, ELSI, RFID	

## Alkulause

Tämä työ tehtiin Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratoriossa. Työn aiheena olleen ELSI-järjestelmän tutkimuksella on laboratoriossa jo useamman vuoden historia ja lisäksi järjestelmän ympärille perustetulla Elsi Technologies Oy:llä on nykyisin merkittävä rooli kehitystyössä. Tämän ja tehtävän laaja-alaisen luonteen vuoksi yhteistyö muiden järjestelmän kanssa työskentelevien ja tutkimusta tekevien ihmisten kanssa oli ensiarvoisen tärkeässä roolissa.

Erityisesti haluan kiittää Henry Rimmistä elektroniikkaa koskevista asiantuntevista neuvoista ja Juha Lindströmiä järjestelmän ohjelmistopuoleen liittyvästä avusta, jota ilman tehtyjen kokeiden läpivieminen olisi ollut mahdotonta. Niinikään haluan kiittää työni ohjaajaa Matti Linnavuota ja valvojaa professori Raimo Sepposta heidän kanssaan käymistäni idearikkaista keskusteluista ja saamastani tuesta.

Sovelletun elektroniikan laboratorio on ollut työympäristönä erinomaisen kannustava ja hengeltään hyvä. Kiitos siitä kuuluu tasapuolisesti koko henkilökunnalle.

Espoossa 9.11.2007

---

Petteri Haapamäki

# Sisällysluettelo

<b>TIIVISTELMÄ.....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>ALKULAUSE.....</b>	<b>4</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO.....</b>	<b>5</b>
<b>SYMBOLIT JA LYHENTEET.....</b>	<b>7</b>
<b>1. JOHDANTO.....</b>	<b>8</b>
1.1 ELSI-järjestelmän taustaa.....	8
1.2 Kilpailijat ja sijoittuminen markkinoilla.....	9
1.2.1 Kameravalvonta.....	9
1.2.2 Hälytysrannekkeet ja painonapit.....	9
1.2.3 Ekahau Positioning Engine ja Aeroscout Visibility System.....	10
1.2.4 Emfit Vital Signs Monitoring ja Dementia Care.....	10
1.3 Työn tarkoitus.....	10
<b>2. AIKAISEMPI TUTKIMUS.....</b>	<b>12</b>
<b>3. ELSI-JÄRJESTELMÄSTÄ YLEISESTI.....</b>	<b>14</b>
3.1 Lattia-anturijärjestelmä.....	14
3.1.1 Ohjauselektronikka.....	14
3.1.2 Mittausperiaate.....	15
3.2 Vuodeanturijärjestelmä.....	15
3.3 Elsi Technologies Oy.....	16
3.4 Pilottikohteet.....	16
3.4.1 Kustaankartanon vanhustentalo.....	16
3.4.2 Harjulan Setlementti.....	16
3.4.3 Lohjan terveyskeskus.....	16
3.4.4 Työterveyslaitos.....	16
3.5 Järjestelmän havaittuja ongelmakohtia.....	17
3.5.1 Sähkökentän kytkeytyminen lattiaraudoitukseen.....	17
3.5.2 RFID-toteutuksen antennin heikko suuntaavuus.....	17
3.5.3 Askelvaimennuskerros ja kerääntyvä sähkövaraus.....	18
3.5.4 Patjan aiheuttama järjestelmän sokeutuminen.....	18
<b>4. ANTURIMATTO.....</b>	<b>19</b>
4.1 Tällä hetkellä käytössä oleva matto.....	19
4.1.1 Versio 9.0.....	19
4.1.2 Versio 10.0.....	19
4.2 Anturin koon ja muodon vaikutus kytkeytymiseen.....	19
4.2.1 Anturin koko.....	20

4.2.2 Anturin muoto.....	23
4.3 RFID-toteutus.....	24
4.3.1 Yleiskatsaus RFID:n maailmaan.....	25
4.3.2 Silmukan koko, muoto ja suuntaavuus.....	26
4.4 Guard-järjestelmästä ja patch-antennista toteutuksen vaihtoehtona.....	31
4.4.1 Guardista yleisesti.....	31
4.4.2 Patch-antennin käytöstä guard-järjestelmän osana.....	31
<b>5. MITTAUSELEKTRONIIKKAVAIHTOEHTOJEN VERTAILU.....</b>	<b>34</b>
5.1 Vertailtavat elektronikat.....	34
5.1.1 MCU V5.....	34
5.1.2 Relaksaatiokortti.....	34
5.1.3 Sänkyanturijärjestelmän mittauselektronikka MCU AD.....	34
5.1.4 MCU V6.....	34
5.2 Askelmittaus.....	35
5.2.1 Mittausjärjestelyt.....	35
5.2.2 Tulokset.....	36
5.3 Simuloidun sydämen sykkeen mittaaminen.....	37
5.3.1 Mittausjärjestelyt.....	37
5.3.2 Tulokset.....	37
<b>6. JÄRJESTELMÄN KÄYTTÖÖNOTOSSA ILMENNEITÄ ONGELMIA..</b>	<b>39</b>
6.1 Askelvaimennus ja varauksen kertyminen.....	39
6.2 Elintoimintosihtäimen mittaaminen patjan läpi.....	41
6.2.1 Sähkökentän johtaminen patjan läpi.....	41
6.2.2 Vitality-arvon laskeminen.....	43
<b>7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....</b>	<b>47</b>
7.1 Johtopäätökset ja tavoitteiden täytyminen.....	47
7.1.1 Anturit.....	47
7.1.2 RFID-toteutus.....	47
7.1.3 Elektronikka.....	48
7.1.4 Patja ja askelvaimennus.....	48
7.2 Jatkokehitys.....	49
7.2.1 Anturimatto.....	49
7.2.2 RFID-toteutus.....	49
7.2.2 Elektronikka.....	50
7.2.3 Patja.....	50
<b>LÄHDELUETTELO.....</b>	<b>51</b>
<b>LIITEET.....</b>	<b>53</b>

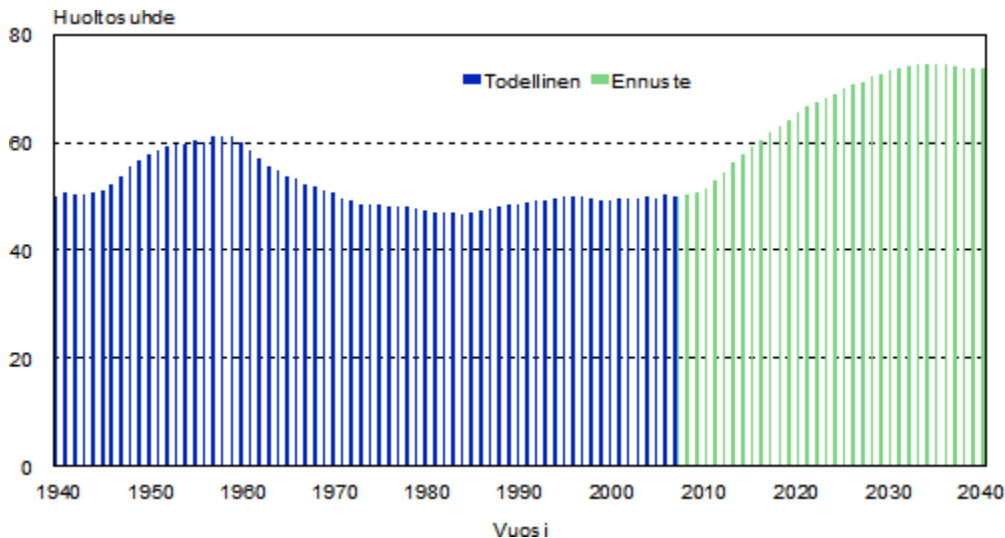
## Symbolit ja lyhenteet

$\lambda$	Aallonpituus
f	Taajuus
c	Valonnopeus
$\rho$	Heijastuskerroin
$S_{11}$	Yksi kaksiportin sirontaparametreista. Kts. $\rho$
L	Antennin maksimimitta
$r_k$	Antennin kaukokentän raja
C	Levykondensaattorin kapasitanssi
A	Levykondensaattorin pinta-ala
d	Levykondensaattorin levyjen etäisyys toisistaan
$\epsilon_o$	Tyhjiö permittiivisyys
Var	Signaalin varianssi (teho)
$Var_{Alarm}$	Vitality-mittauksen elottomaksi toteamisen raja-arvo
$Var_{Max}$	Vitality mittauksen skaalattava maksimiarvo
+V	Portista etenevän aallon amplitudi
-V	Portista heijastuvan aallon amplitudi
CAN	Controller Area Network
ELSI	Electrical Sensor with Intelligence
ESD	Electrostatic discharge
HUS	Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiiri
IC	Integrated circuit
ISM	Industrial, scientific and medical
MCU-kortti	Signaalin käsittelyyn kykenevä mittauselektroniikkakortti
MCU AD	Sänkyjärjestelmää varten suunniteltu mittauskortti
MCU V5	Kirjoitushetkellä lattia-antujärjestelmässä käytettävä MCU
MCU V6	Korkeampaa herätejännitettä käyttävä MCU-kortti
MUX-kortti	Multipleksoinnista vastaava piirikortti
PICO	Personal Intelligent Companion
RFID	Radio frequency identification
WLAN	Wireless Local Area Network

# 1 Johdanto

## 1.1 ELSI-järjestelmän taustaa

Väestön ikääntyminen on Suomessa EU-alueen nopeinta. Vielä tällä hetkellä huoltosuhte (työssäkäyvien suhde elätettävään väestöön) on Suomessa EU:n keskitasoa, mutta vuonna 2030 se tulee olemaan EU:n epäedullisin. Tilanne alkaa merkittävästi heiketä juuri nyt, kun suuret ikäluokat ovat siirtymässä eläkkeelle.



Kuva 1: Huoltosuhteen muuttuminen Suomessa välillä 1940-2040 (1)

Tämän lisäksi nopean muuttoliikkeen takia tilanne on maan eri osissa hyvin erilainen. Usein nopeimmin harmaantuvat alueet ovat myös niitä, missä asutus on harvaa ja etäisyydet suuret.

Onkin selvää, että terveydenhuollon ja erityisesti vanhustenhuollon järjestelmät ovat Suomessa valtaisten haasteiden edessä. Tarve varmistaa rajallisten resurssien riittävyys on ajanut etsimään uusia keinoja hoitohenkilökunnan työtaakan helpottamiseen ja vanhusten kotihoidon aikaisempaa suurempaan tukemiseen.

Omalta osaltaan vastaamaan näihin haasteisiin on syntynyt myös ELSI (Electric Sensors with Intelligence) (2) Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratoriossa professori Raimo Sepposen ideoiden pohjalta.

ELSI-järjestelmä perustuu kapasitiiviseen lähikenttäkuvantamiseen. Siinä valvottavan kiinteistön lattiapinta-ala katetaan kapasitiivisista antureista koostuvalla matolla. Kun



kahden anturin väliin ilmestyy johtava kohde, voidaan se havaita sähkökentän muuttuessa. Näin voidaan kiinteistössä liikkuvia henkilöitä valvoa heidän intymiteettisuojaansa loukkaamatta.

Maassa makaavasta kohteesta voidaan mitata myös elintoimintesignaali, mikä luo aivan uudenlaisia mahdollisuuksia onnettomuustapauksien havainnointiin, koska hälytyksen tekeminen ei ole itse uhrin vastuulla kuten esimerkiksi tälläkin hetkellä suositussa turvarannekeratkaisussa.

Järjestelmään on mahdollista sisällyttää myös RFID-ratkaisu, joka mahdollistaa esimerkiksi valvottavassa kiinteistössä liikkuvien henkilöiden yksilöinnin. Tätä taas voidaan hyödyntää esimerkiksi hoitolaitoksen työn tehostamisessa tai järjestelmän hyödyntämiseen taloautomaatiossa.

## **1.2 Kilpailijat ja sijoittuminen markkinoilla**

Markkinoilla on jo tällä hetkellä varsin paljon erilaisia henkilöiden sisäpaikannukseen ja monitorointiin käytettäviä ratkaisuja. Niiden ominaisuudet ja soveltuvuus eri tilanteisiin poikkeavat merkittävästi toisistaan eivätkä ne siksi kilpaile aina suoraan toistensa kanssa.

### **1.2.1 Kameravalvonta**

Ehkä perinteisin näistä ratkaisuista on yksinkertainen kameravalvonta. Kameratekniikat voivat olla jatkuvasti päällä tai aktivoitua liikkeen perusteella ja ne voivat olla joko tallentavia tai tallentamattomia. Kameravalvonnan etuna on tekniikan olo pitkään markkinoilla ja sen tuttuus asiakkaille sekä useimmiten suhteellisen alhainen hinta. Ominaisuudet ovat kuitenkin varsin rajoittuneet eikä ratkaisulla pystytä esimerkiksi seuraamaan valvottavan henkilön elintoimintoja. Lisäksi valvottavan henkilön intymiteettisuoja on usein vaikea taata ja kameran välittämän kuvan seuraaminen sitoo työvoimaa.

### **1.2.2 Hälytysrannekkeet ja painonapit**

Kameravalvonnan lisäksi tälläkin hetkellä jo varsin laajasti käytössä olevaa tekniikkaa ovat erilaiset hälytysrannekkeet ja painonapit. Myös niiden hyvänä puolena ovat tekniikan yksinkertaisuus ja suhteellisen halpa hinta. Hälytysrannekeisiin on myös mahdollista liittää RFID-pohjaisia henkilöpaikannusratkaisuja.

Vaatus siinä, että apua tarvitseva henkilö suorittaa itse hälytyksen rajoittaa kuitenkin niiden soveltuvuutta esimerkiksi dementiapotilaiden hoidossa tai vakavan sairaskohtauksen tapauksessa. Myös toistuvat tahalliset sekä tarpeettomat hälytykset ovat hoitohenkilökunnalle tutuksi tullut ongelma.

### 1.2.3 Ekahau Positioning Engine ja Aeroscout Visibility System

Vielä hieman harvinaisempaa tekniikkaa edustavat WLAN-pohjaiset kolmiomittaukseen perustuvat sisäpaikannusjärjestelmät. Mittaus voi perustua suoraan signaalin heikkenemiseen (Ekahau Positioning Engine) (3) tai kulkuaikaan (Aeroscout Visibility System). Molempien järjestelmien paikannustarkkuus on metrin luokkaa, mikä riittää yleiselle sisäpaikannusjärjestelmälle.

Näiden ratkaisuiden vahvuus on siinä, että ne kykenevät hyödyntämään valvottavan kiinteistön olemassa olevaa sisäverkkoa eivätkä vaadi mittavia muutostöitä, jolloin suurenkin rakennuksen, kuten sairaalan, paikannusjärjestelmän kustannukset pysyvät kohtuullisella tasolla. Niillä voidaan henkilöiden lisäksi paikantaa myös erilaisten laitteita ja näin tehostaa organisaation toimintaa. Ne eivät kuitenkaan pysty tarjoamaan ELSI-järjestelmän kaltaista potilaan seurantatarkkuutta ja elintoimintojen mittaamista, eivätkä menetelmät siis useimmissa tapauksessa kilpaile suoraan keskenään vaan ovat tyypeiltään ennemminkin toisiaan tukevia.

### 1.2.4 Emfit Vital Signs Monitoring ja Dementia Care

Tällä hetkellä markkinoilla olevista tuotteista eniten ELSI-järjestelmän kaltainen on niinkään suomalaisen Emfit Oy:n tarjoama pietsosähköiseen ilmiöön perustuva valvontajärjestelmä (4). Sen toiminta perustuu anturiin kohdistuvan voiman aiheuttaman puristuksen havainnointiin, mikä rajoittaa anturin sijoittamista esimerkiksi parketin ja laminaatin kaltaisten joustamattomien lattiamateriaalien alle. Anturit eivät myöskään kykene havaitsemaan henkilön tarkkaa sijaintia anturimatolla, joten se sijoitetaan yleensä monitoroinnin kannalta kiinnostaviin paikkoihin kuten ovien edustoille.

Emfit Oy:n antureilla pystytään mittaamaan elintoimintosi signaali kuten ELSI-järjestelmälläkin, mutta siihen ei ole liitettävissä RFID-tekniikkaa eikä se kykene siis tarkempaan valvottavan henkilön tunnistukseen. Terveystieteiden alalla järjestelmät soveltuvat siis hyvin samankaltaisiin tehtäviin. ELSI-järjestelmän etuina ovat kuitenkin RFID-tekniikan yhdistäminen monitorointiin sekä parempi sijoitettavuus erilaisiin kiinteistöihin. Sänkymonitoroinnin osalta menetelmien edut ja haitat ovat hyvin samankaltaisia.

## 1.3 Työn tarkoitus

ELSI-järjestelmän kehitys on ollut useiden henkilöiden ja tahojen yhteinen aikaansaannos. Pääosin se on toteutettu Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratoriossa, mutta esimerkiksi anturit ovat olleet UPM:n käsialaa ja lisäksi järjestelmän ympärille syntynyt spin-off -yritys, Elsi Technologies Oy (5) on myös aktiivinen erityisesti pilottihankkeisiin liittyvien ongelmien ratkomisen ja kehitystyön osalta.

Tämän diplomityön tavoitteena oli järjestelmän antureiden ja elektroniikkatoteutusten analysointi parannusehdotusten esittämiseksi ja tulevaisuuden kehitystyön suuntaviivojen määrittämiseksi. Ratkaisuehdotukset esitetään kaikkiin järjestelmän pilottiasennusten aikana havaittuihin ongelmiin ja puutteisiin, jotka liittyvät työn aihepiiriin. Suurinta kehitystarve on antureihin liittyvässä analyysissa johtuen alueen aikaisemmasta vähäisestä tutkimuksesta. Niinikään järjestelmän kehityksen aikana syntyneiden useiden erilaisten elektroniikkatoteutusten vertailu tärkeä osa tätä työtä. Järjestelmään liittyvän ohjelmiston kehitys tapahtuu Elsi Technologies Oy:ssä eikä sitä käsitellä tässä diplomityössä.

Patja-anturin ja eri elektroniikkatoteutusten tutkimuksessa tehtiin tiivistä yhteistyötä Elsi Technologies Oy:n kanssa. Elektroniikkavaihtoehtojen mittaukset ovat tämän diplomityön tekijän sekä Elsi Technologies Oy:n työntekijöiden suorittamia. Mittauksissa apuna käytetyt tekojalat ovat Sovelletun elektroniikan laboratorion Kimmo Rajalan valmistamat ja Elsi-järjestelmän ohjelmistoon tehdyt muutokset toteutti Juha Lindström Elsi Technologies Oy:stä. Patja-anturilla tehty yön yli mittaus on niinikään Juha Lindströmin suorittama

## 2 Aikaisempi tutkimus

Thomas Böckelman on diplomityössään (6) tutkinut teknisten apuvälineiden hyödyntämistä vanhusten kotihoidossa ja niiden vaikutusta turvallisuuteen. Työssä tullaan siihen johtopäätökseen, että geriatrisessa hoidossa täytyy siirtyä kohti ei-institutionaalisia ratkaisuja laitoshoidon kustannuksella julkisen terveydenhoidon resurssien niukkuuden vuoksi. Turvarannekkeen kaltaisten teknisten ratkaisuiden todetaan myös lisäävän merkittävästi vanhuksen turvallisuutta kotiooloissa ja mahdollistavan omalta osaltaan aikaisempaa pidemmän asumisen omassa kodissa.

Kirsi Siivola on diplomityössään (7) tutkinut paikannus- ja tunnistusteknologioiden hyödyntämistä Meilahden sairaala-alueella osana HUS:ssa käynnissä olevaa Ihannesairaala-hanketta (8), jonka tarkoituksena on tuottaa tulevaisuuden erikoissairaanhoidon toimintamalli. RFID-järjestelmän kaltaisilla langattomilla tunnistusmenetelmillä todettiin voitavan saavuttaa merkittäviä säästöjä ja henkilökunnan työn tehostamista.

Panu Lehikoisen diplomityössä (9) selvitetään kuvapuhelintekniikan soveltamista vanhustenhoidossa sekä erityisryhmien palveluille asettamia vaatimuksia. Lehikoinen toteaa myös kuvapuhelintekniikan voivan parantaa vanhusten kykyä elää aikaisempaa pidempään omassa kodissaan. Hän kiinnittää huomiota myös turvatekniikan toimintavarmuuden suureen merkitykseen.

ELSI-järjestelmän elektroniikka on kehitetty Henri Rimmisen diplomityössä Kapasitiivisen anturin elektroniikka (10). Rimmisen menetelmässä kapasitiivisten antureiden kautta kulkeva vaihtovirta mitataan tarkoitukseen kehitetyllä herkällä mittaaselektroniikalla. Johtavan kappaleen vaikutus sähkökenttään havaitaan virran muutoksina. Elektroniikka kykenee myös mittaamaan henkilön elintoimintosiinaalin, joka saadaan perussignaalista vahvistamalla ja suodattamalla.

ELSI-järjestelmän ohjelmistoratkaisuja liittyen Henry Rimmisen kehittämään elektroniikkaan kehitettiin Lauri Westlingin diplomityössä (11). Diplomityöhön kuuluivat ratkaisut kaatuneen henkilön tunnistamisesta ja elintoimintosiinaalin mittaamisesta ELSI-mittausyksikön antaman syötteen perusteella. Kehitetty ohjelmisto kykenee myös anturiverkon hallintaan yhden huoneiston alueella. Työssään Westling tuo esiin myös ELSI-järjestelmän sovellusmahdollisuudet poliisin putkavalvonnassa, taloautomaatiossa, kulunvalvonnassa ja vähittäistavarakaupassa.

Antti Ropponen on omassa diplomityössään, Henkilön paikantamiseen ja tunnistamiseen soveltuva LF-järjestelmä (12) , tutkinut ELSI-järjestelmän lattia-antureiden silmukka-antennien käyttöä henkilöpaikannusjärjestelmässä. Työssä rakennettiin ensimmäiset prototyytit lähettimestä sekä vastaanottimesta ja nämä saatiin toimimaan kohtuullisen luotettavasti. Työssä huomattiin silmukka-antennien alhaisen suuntaavuuden käytetyllä 100 kHz taajuudella muodostavan ongelman, mutta ELSI-järjestelmän todettiin yleisesti

ottaen soveltuvan henkilöpaikannusjärjestelmän pohjaksi. Myös tunnisteet todettiin voitavan rakentaa niin pieniksi, että niitä voidaan helposti kuljettaa mukana.

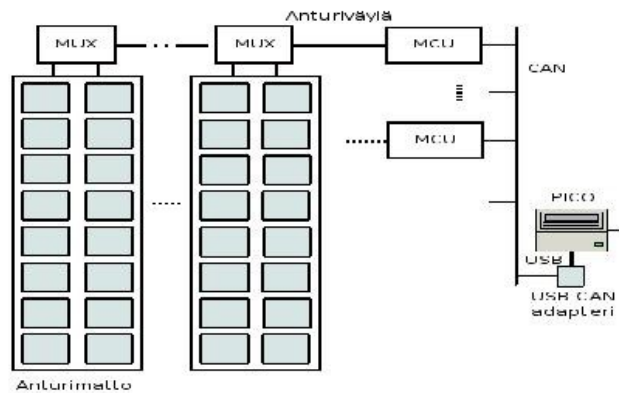
Tuukka Kuuramaa on suunnitellut diplomityössään (13) ELSI-järjestelmästä vuodemonitorointiin soveltuvan version. Työssä kehitettiin kapasitanssin mittaamiseen valmistetun IC-piirin perusteella uuden mittausmoduulin prototyyppi. Niinikään työssä kehitettiin algoritmit henkilön monitorointiin vuoteessa, poistumisen ennakoointiin ja hälytyksen antamiseen eri ongelmatilanteissa. Moduuli on CAN-väylän kautta mahdollista liittää lattia-anturijärjestelmän tavoin osaksi ELSI-järjestelmää.

## 3 ELSI-järjestelmästä yleisesti

### 3.1 Lattia-anturijärjestelmä

Kuten johdanto-luvussa jo todettiin ELSI-järjestelmän toiminta perustuu monitoroitavan kiinteistön lattiapinnoitteen alle sijoitettaviin kapasitiivisiin antureihin sekä niitä valvovaan ohjauselektroniikkaan. Anturimattojen tapaan lattialistojen taakse asennettava ohjauselektroniikka saadaan sijoitettua tehokkaasti pois näkyviltä.

Kuvassa 2 on nähtävillä lattiamonitorointijärjestelmän tyypillinen arkkitehtuuri siihen kuuluvine komponentteineen ja kuvassa 23 Sovelletun elektroniikan laboratorion testaushuoneeseen asennettuja anturimattoja.



Kuva 2: ELSI-lattiamonitorointijärjestelmän arkkitehtuuri. Kuva Elsi Technologies luvalla.

Oy:n

#### 3.1.1 Ohjauselektroniikka

Lattiamonitorointijärjestelmän ohjauselektroniikka muodostuu kahdenlaisista komponenteista, eli MUX- ja MCU-korteista. MUX-komponenttien tehtävänä on halutun anturimaton ruudun valinta mittauksen kohteeksi. Varsinaisen mittauksen suorittaminen on taas MCU-kortin vastuulla. MUX-kortteja tarvitaan yksi kutakin anturimattoa kohden ja MCU-kortteja on tyypillisesti yksi mitattavaa huonetta kohden.

MCU-kortti välittää mittaustulokset eteenpäin PICO-aluepalvelimen käsiteltäviksi. Tiedon välitykseen käytetään teollisuusautomaation sovelluksissa suosittua CAN-kenttäväylää. PICO-aluepalvelin analysoi ohjauselektroniikalta saamansa mittaustulokset ja luo sen perusteella mallin monitoroitavan alueen tapahtumista. Esimerkkejä tällaisista tapahtumista ovat vaikkapa henkilön kaatuminen ja poistuminen huoneesta.

PICO-palvelimelta informaatio voidaan välittää sovelluksesta riippuen esimerkiksi keskuspalvelimelle, joka luokittelee tapahtumat ja suorittaa halutut toimenpiteet kuten hoitohenkilökunnalle annettavat hälytykset.

### **3.1.2 Mittausperiaate**

Lattia-anturijärjestelmässä mittauksen perustana on kahden anturiruudun välisen virran seuranta. Passiivisessa tilassa ruutujen välillä kulkee pelkkä lepovirta, mutta johtavan esineen kuten ihmisen kytkeytyessä kapasitiivisesti ruutujen välille, tämä virta kasvaa. Jälkimmäistä tapausta kutsutaan aktiiviseksi tilaksi.

Kussakin mittauksessa valitaan anturilevyjen muodostamasta ruudukosta itse mittava anturi sekä x- tai y-suunnassa sijaitseva viereinen ruutu, joka toimii paluutienä. Isoloinnin ansiosta sähkökentän suunta on määritettävissä tarkasti näiden kahden ruudun avulla. Näin saatua mittaustulosta voidaan edelleen verrata passiivisen tilan lepovirran suuruuteen.

Mitattavassa kiinteistössä olevien objektien kuten huonekalujen aiheuttaman häirinnän välttämiseksi ohjauselektroniikka kalibroi itseään säännöllisin väliajoin. Suoritetun kalibroinnin ansiosta pysyvien johtavien kohteiden vaikutus voidaan jättää mittauksissa huomiotta.

Lattiaelektroniikan toteutus on kuvattu tarkasti Henry Rimmisen diplomityössä Kapasitiivisen anturin elektroniikka.

### **3.2 ELSI-vuodeanturijärjestelmä**

ELSI-järjestelmästä on kehitetty myös vuodemonitorointiin soveltuva versio. Vaikka se perustuu samaan periaatteeseen anturilevyjen välisestä kapasitiivisesta kytkeytymisestä kuin lattiamonitorointijärjestelmäkin, on toteutuksessa myös merkittäviä eroja.

Vuodejärjestelmässä mittaus ei perustu erilliskomponenteista valmistettuun elektroniikkaan vaan Analog Devicen kapasitiivisia mittauksia varten valmistamaan mikrokontrolleriin AD7142 (14). Kyseisessä mikrokontrollerissa on 14 kanavaa kapasitiivisia mittauksia varten. Se on suunniteltu käyttämään mittauksessa shunt-metodia, jossa herätesignaali ohikytkeytyy maahan johtavan kohteen kautta. Vuodejärjestelmässä on kuitenkin päädytty elektroniikan isoimiseen.

Vuodemonitorointijärjestelmässä mitataan vain muutamien anturiparien muodostamaa ruudukkoa toisin kuin lattiamonitorointijärjestelmässä. Siinä ollaan myös erityisen kiinnostuneita aktiivisten ruutujen muodostamista kuvioista ja niiden muutosnopeuksista, joiden perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä vuoteella makaavan henkilön tilasta kuten siitä onko tämä mahdollisesti nousemassa pois vuoteesta.

Vuodenanturijärjestelmän toteutus on selvitetty kattavasti Tuukka Kuuranmaan diplomityössä Kapasitiivinen vuodeanturijärjestelmä.

### **3.3 Elsi Technologies Oy**

Elsi Technologies Oy on Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratoriossa tehdystä tutkimuksesta alkunsa saanut spin-off-yritys, joka markkinoi ja toimittaa kapasitiiviseen anturitekniikkaan perustuvia kehittyneitä monitorointijärjestelmiä.

### **3.4 Pilottikohteet**

Elsi-järjestelmän kehitys on edennyt vaiheeseen, jossa sitä testataan parhaillaan useammassa pilottikohteessa samanaikaisesti. Kustaankartanon vanhustentalon A-rakennusta lukuun ottamatta vastuu näistä projekteista on Elsi Technologies Oy:llä, mutta yhteistyö Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorion kanssa on tiivistä.

#### **3.4.1 Kustaankartanon vanhustentalo**

Kustaankartanon pilottiprojekti jakaantuu kahteen osaan. A-talossa ELSI-järjestelmä valvoo kahta huonetta ja se on Teknillisen korkeakoulun vastuulla. G-taloon toimitettu järjestelmä valvoo sen sijaan koko kiinteistöä ja kyseinen projekti on Elsi Technologies Oy:n vastuulla kuten muutkin pilottihankkeet.

#### **3.4.2 Harjulan Setlementti**

Lahteen on toimitettu Harjulan Setlementti ry:n ylläpitämään kiinteistöön Elsi-järjestelmä, joka valvoo kahta huoneistoa.

#### **3.4.3 Lohjan terveyskeskus**

Lohjan terveyskeskuksessa on käynnissä Elsi-järjestelmän pilottiprojekti, jossa järjestelmää käytetään päihtyneiden potilaiden elintoimintojen seurantaan turvahuoneessa.

#### **3.4.4 Työterveyslaitos**

Työterveyslaitokselle on toimitettu räätälöity Elsi-järjestelmä, joka kykenee yhden huoneen liikkeen seurantaan.



### **3.5 Järjestelmän havaittuja ongelmakohtia**

Elsi-järjestelmä on tällä hetkellä tuotekehityksensä osalta vaiheessa, jossa sen testauksen ja pilottiprojektien mukanaan tuomien kokemusten myötä ne osa-alueet, jotka vaativat lisäkehitystä ja esiin tulleiden ongelmien ratkomista, ovat alkaneet selkeytyä. Joihinkin näistä ongelmista ja kysymyksistä pyritään vastaamaan myös tämän diplomityön puitteissa.

#### **3.5.1 Sähkökentän kytkeytyminen lattiaraudoitukseen**

Henry Rimmisen diplomityössä kahden pläkipeltineliön, joiden sivun pituus on 33cm, väliseksi kapasitanssiksi ilmassa laskettiin graafisella menetelmällä 3,5 pF. Betonilattialla lattiaraudoituksen yläpuolella tulokseksi saatiin sen sijaan 107 pF, josta voitiin vetää johtopäätös siitä, että suurin osa signaalivirrasta muodostuisi lattiaraudoituksen kautta siirtyvästä lepovirrasta. Mitattaessa vastaaviksi arvoiksi saatiin 3,56 pF ja 233 pF. Tästä seuraa, että aktiivisen tilan ja passiivisen tilan virtojen suhteellinen muutos jää hyvin pieneksi.

Vuodeanturijärjestelmän kehityksen puitteissa on tutkittu samankokoisten pläkipeltineliöiden välisiä kapasitansseja sairaalavuoteella. Lopputuloksena tultiin siihen, että jalan aiheuttama passiivisen ja aktiivisen tilan muutos oli 142% verrattuna lattiajärjestelmän 22%:iin. Tämä johtui sähkökentän huomattavasti heikommasta kytkeytymisestä vuoteen makuutasen alla sijaitseviin metalliosiin verrattuna lattiaanturijärjestelmän betonirauoituksen vaikutuksiin.

Tämän diplomityön luvussa 5 on arvioitu kirjoitushetkellä olemassa olevien elektroniikka-vaihtoehtojen herkkyyttä lattia-anturijärjestelmässä.

#### **3.5.2 RFID-toteutuksen antennin heikko suuntaavuus**

Antti Ropposen diplomityössään tekemän ELSI-järjestelmän henkilöpaikannusjärjestelmää käsittelevän tutkimuksen puitteissa kävi ilmi, että käytössä olevalla toteutuksella lattia-antennien suuntaavuus on niin heikko, että RFID-tunnisteet aktivoituvat jopa kolmen metrin säteellä niistä (15). Tämän diplomityön RFID-toteutusta käsittelevässä luvussa esitetään yksi mahdollisuus ongelman ratkaisemiseksi.

### **3.5.3 Askelvaimennuskerros ja kerääntyvä sähkövaraus**

Harjulan pilottiprojektissa on havaittu erikoinen häiriö, jossa suuri anturialue saattaa yllättäen siirtyä aktiiviseen tilaan ilman havaittavaa syytä sokeuttaen näin järjestelmän. Tätä ongelmaa ja sen mahdollista syytä on tutkittu tämän diplomityön luvussa 6.1.

### **3.5.4 Patjan aiheuttama järjestelmän sokeutuminen**

Lohjan terveystieteiden tutkimuksessa käynnissä olevan pilottihankkeen puitteissa on havaittu, että tavallinen superlonipatja kykenee sokeuttamaan ELSI-järjestelmän niin, ettei patjalla olevaa henkilöä näy lainkaan eikä tämän elintoimintosihtäimiä kyetä mittaamaan. Tätä ongelmaa on käsitelty tämän diplomityön luvussa 6.2.

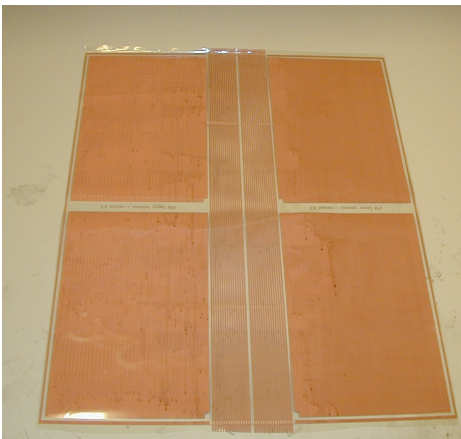
## 4 Anturimatto

### 4.1 Tällä hetkellä käytössä oleva matto

Tällä hetkellä Elsi-järjestelmässä käytettävät anturit ovat UPM:n kehittämiä ja esimerkiksi niiden koko on määräytynyt paljolti valmiina olevien tuotantolaitteiden ominaisuuksien perusteella. Tästä syystä antureiden systemaattinen tutkiminen niiden nykyisen toteutustavan soveltuvuuden kartoittamiseksi on välttämätöntä järjestelmän jatkokehityksen ja perusteltujen parannusehdotusten esittämisen kannalta.

#### 4.1.1 Versio 9.0

Tässä vanhemmassa anturimaton versiossa anturit on toteutettu anturijohdinten molemmille puolille jaettujen pienempien palojen avulla, jotka on yhdistetty toisiinsa. Tämä on ollut tarpeen, jotta mattoon on saatu sisällytettyä myös antennilooppi järjestelmän RFID-toteutusta varten.



Kuva 3 : Anturimaton versio 9.0



Kuva 4: Anturimaton versio 10.0

#### 4.1.2 Versio 10.0

Kirjoitushetkellä tämä on maton uusin versio. Siinä suorakulmaisten alumiinikalvojen koko on 290 mm x 350 mm ja ne on sijoitettu mattoon yhteen riviin 14 mm välein. Antureiden johdinten sijoittelutavan ansiosta asennusvaiheessa ei tarvita erillistä mittausta lähinnä seinää sijaitsevan anturin järjestysnumeron tunnistamiseksi. Tähän maton versioon ei ole sisällytetty lainkaan antennilooppia RFID-toteutusta varten.

## 4.2 Anturin koon ja muodon vaikutus kytkeytymiseen

Tässä diplomityössä tutkittiin antureiden erilaisten geometrioiden ja koon vaikutusta sen

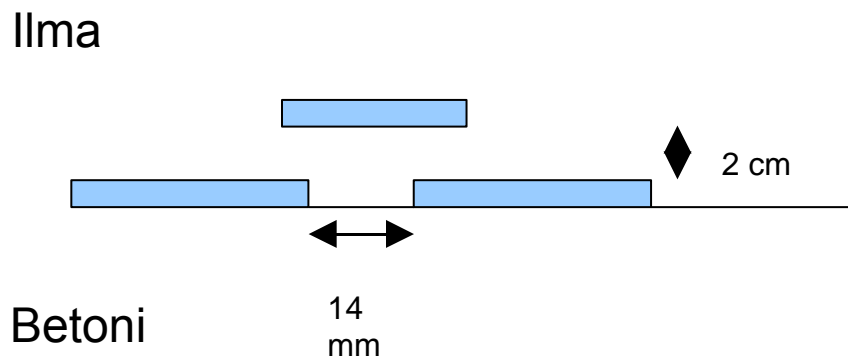
kytkeytymisen voimakkuuteen, joka syntyy, kun johdekappale tuodaan niiden läheisyyteen. Tavoitteena oli tutkia nykyisen toteutuksen sopivuutta käyttötarkoitukseensa ja pyrkiä esittämään mahdollisia parannusehdotuksia asian suhteen.

Tutkimuksessa käytettiin pääasiassa Zeland Software Inc:n (16) IE3D-simulaatio-ohjelmistoa, koska se havaittiin alkuvaiheen kokeilujen perusteella ensimmäisenä vaihtoehtona ollutta Comsol Groupin Comsol Multiphysics -simulaatio-ohjelmistoa huomattavasti paremmin tarkoitukseen sopivaksi. Tärkein ratkaisuun vaikuttanut asia oli mahdollisuus tässä työssä tarvittavien erilaisten anturigeometrioiden yksinkertaisempaan toteutustapaan IE3D-ohjelmiston puitteissa. Toinen merkittävä etu oli mahdollisuus käyttää samaa ohjelmistoa sekä antureiden koon ja muodon analyysissä että järjestelmän RFID-toteutuksen tutkimuksessa.

#### 4.2.1 Anturin koko

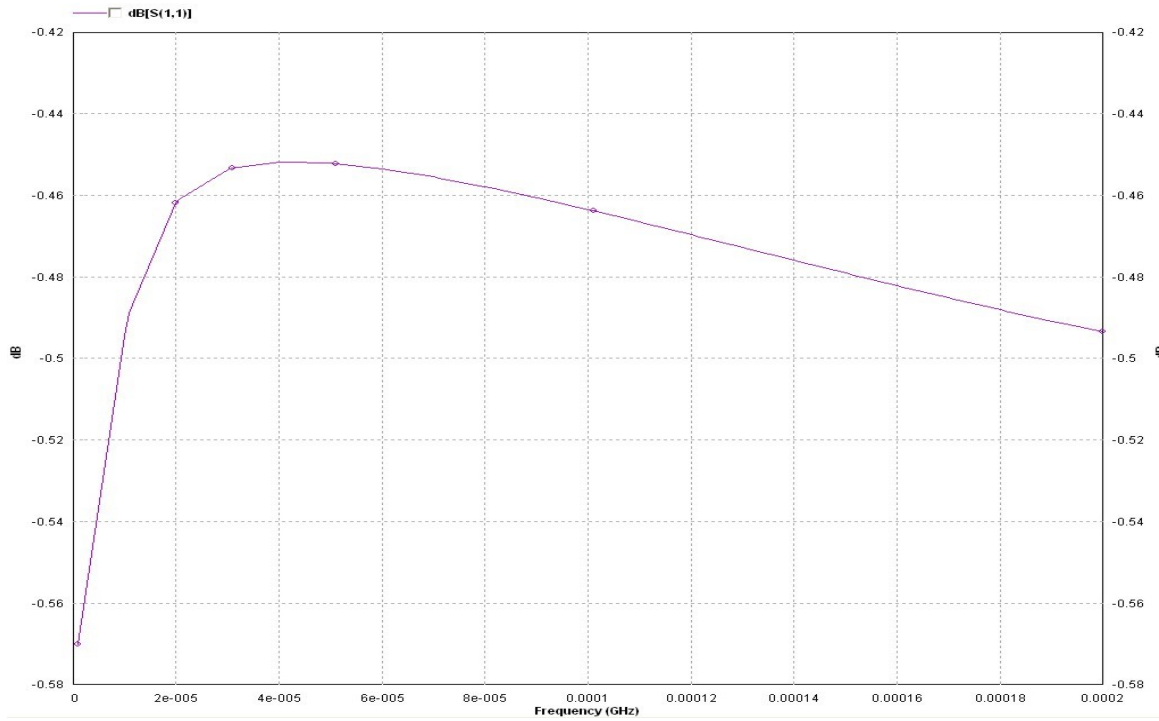
Tutkimuksessa otettiin lähtökohdaksi anturin versio 10.0 sen yksinkertaisemman geometrian perusteella. Aluksi simulaatiossa kaksi 290mm x 350 mm anturia sijoitettiin vierekkäin samaan tasoon 14mm etäisyydelle toisistaan. Niiden alle sijoitettiin betonia simuloiva taso, jonka parametrit saatiin sovelletun elektroniikan laboratoriossa aikaisemmin tehdystä tutkimuksesta. Tässä betonin suhteelliseksi dielektrisyysvakioksi määriteltiin 10,9. Se vastaa 32 päivää kuivunutta betonia 80 kHz taajuudella (17).

Antureiden yläpuolelle, tarkalleen niiden väliin, 20mm etäisyydelle sijoitettiin johdekappale, jonka tehtävänä oli simuloida antureiden yläpuolella seisovaa ihmistä. Johdekappaleen kooksi valittiin 20cm x 30cm, joka vastaa suurikokoisen ihmisen jalkojen pinta-alaa tämän seistessä paikallaan tasajalkaa.

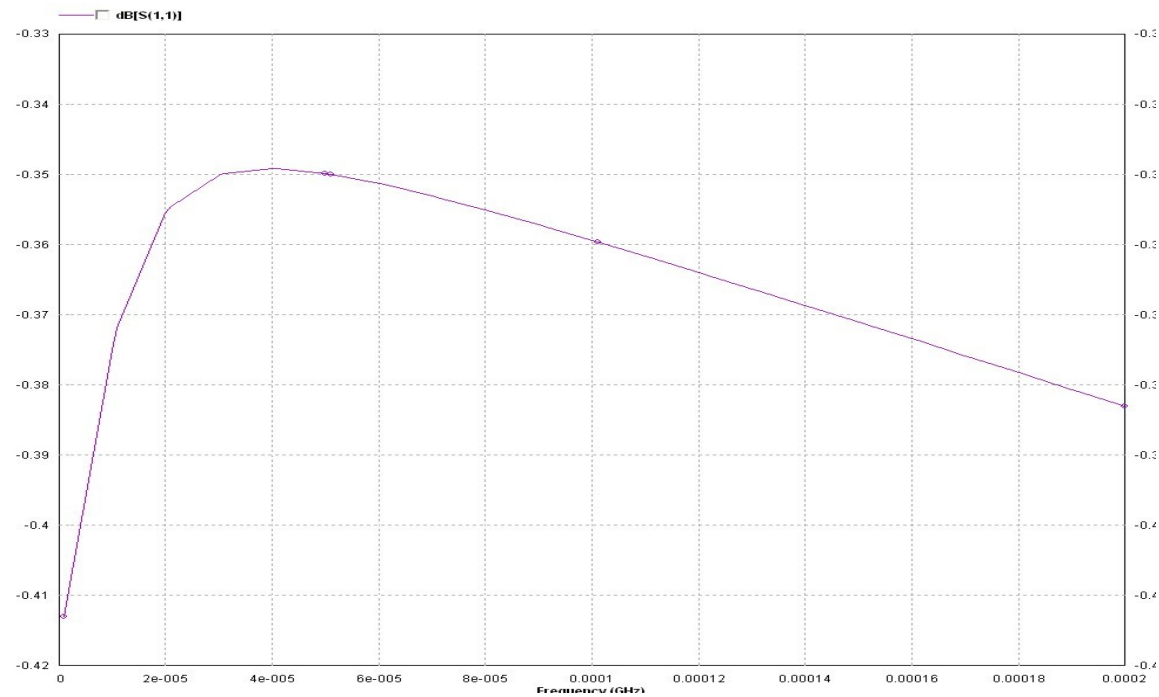


Kuva 5: Simulaation lähtötilanne.

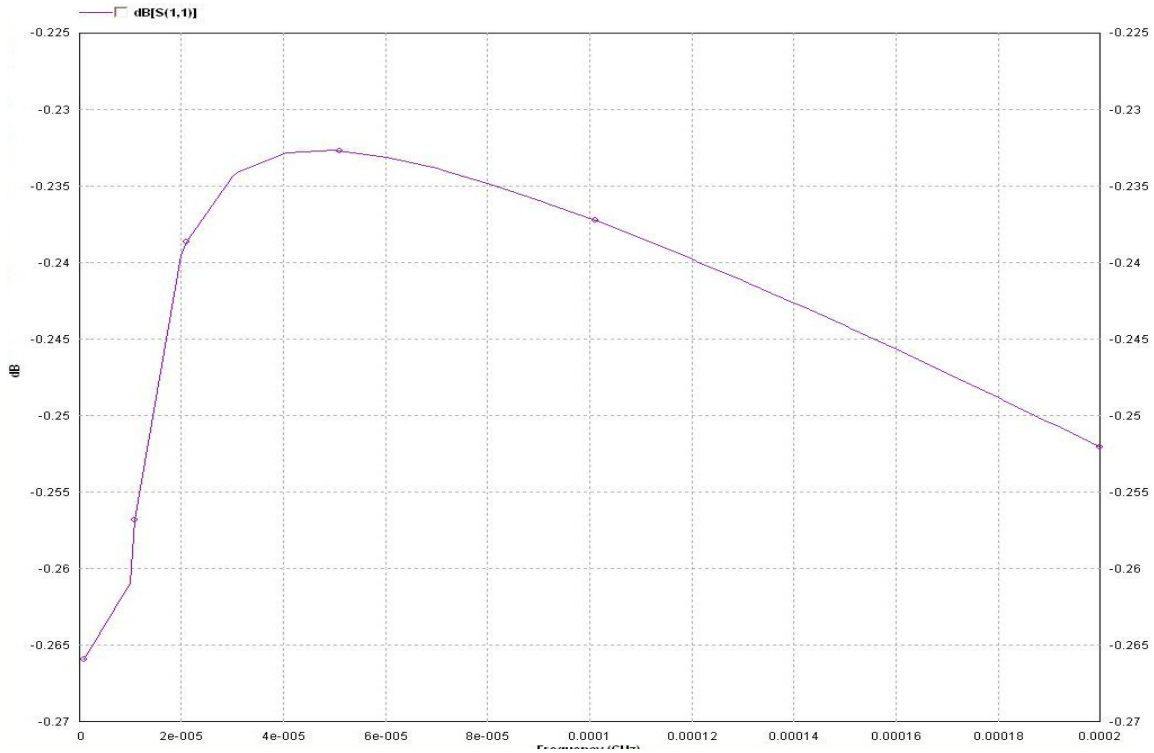
Kytkeytymisen voimakkuutta tutkittiin simuloimalla sitä vaimentumista, joka tapahtuu, kun signaali kytketään toiseen antureista ja vastaanotetaan toisessa.



Kuva 6: Portin 1 heijastuskertoimen arvo taajuusalueella 0-200 kHz. Anturin koko 25 cm



Kuva 7: Portin 1 heijastuskertoimen arvo taajuusalueella 0-200 kHz. Anturin koko 35cm



**Kuva 8: Portin 1 heijastuskertoimen arvo taajuusalueella 0-200 kHz. Anturin koko 35cm (ei kohdetta antureiden yläpuolella)**

Seuraavaksi alkutilannetta lähdettiin muuttamaan muokkaamalla antureiden kokoa. Simulaatioita tehtiin lukuisia sekä tällä hetkellä käytettävää suuremmilla että pienemmillä antureilla.

Kyseisistä kuvaajista nähdään ensimmäiseen anturiin simulaatiossa kytketyn portin 1 heijastuskertoimen, eli sirontaparametrin S11 (18) muuttuminen taajuuden funktiona. Mitä pienempi heijastuskerroin sitä suurempi osa signaalista pääsee toiseen anturiin kytketylle portille 2 ja sitä parempi kytkeytyminen.

$$\rho = S_{11} = \frac{-V}{+V} \quad (4.1)$$

Taulukkoon 1 on koottu heijastuskertoimien huippuarvot sekä niiden arvot taajuudella 200 kHz eri kokoisille antureille. Kuvaajasta voidaan nähdä simulaation toimimattomuus hyvin alhaisilla taajuuksissa, joka johtuu IE3D-ohjelmiston suuntautumisesta korkeataajuisiin sovelluksiin. Tästä johtuen toisena tutkittuna arvona päätettiin käyttää juuri huippuarvoa.

**Taulukko 1: Eri kokoisten antureiden portin 1 heijastuskertoimen arvoja**

Anturin koko (pidempi sivu) (cm)	S11 huippuarvo (dB)	S11 200 kHz (dB)
40	-0,242	-0,261
35	-0,348	-0,386
33	-0,371	-0,410
30	-0,398	-0,437
27	-0,425	-0,482
25	-0,451	-0,492
22	-0,502	-0,551

Kun antureiden päällä ei ollut lainkaan kohdetta saatiin 35cm anturille vastaaviksi arvoiksi -0,233 dB ja -0,252 dB. Erot tilanteeseen, jossa antureiden yläpuolella oli kohde olivat siis 0,115 dB ja 0,134 dB. Vastaavasti erot 35cm ja 25cm antureiden välillä olivat 0,103 dB ja 0,106 dB. Anturin pienentämisellä kytkeytyminen parantui näin ollen lähes yhtä paljon kuin tilanteessa, jossa johdekappale tuotiin sellaisten antureiden yläpuolelle, joiden yläpuolella ei ollut alkutilanteessa mitään.

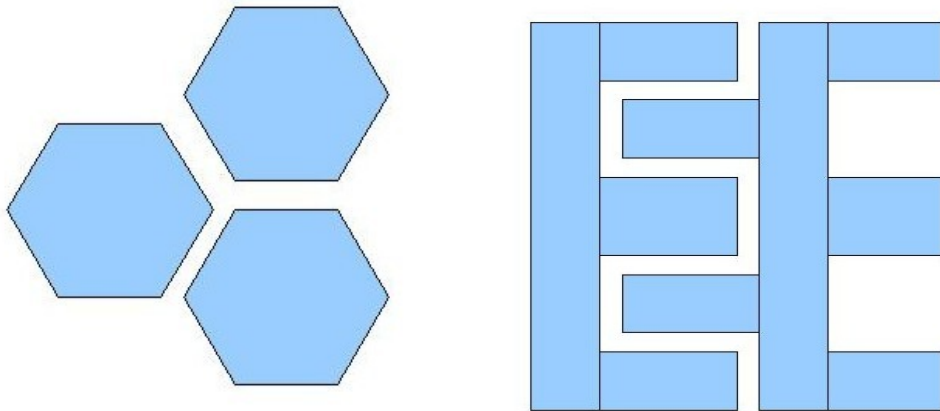
Simulaatioiden perusteella havaittiin siis, että antureiden koon pienentäminen parantaa kytkeytymistä merkittävästi. Koska aluksi valittu johdekappaleen koko on varsin suuri verrattuna todelliseen tilanteeseen, jossa ihminen kävelee anturimatolla, ja jossa useimmiten vain tämän toinen jalka on sijoittunut kahden anturin välille, tutkittiin seuraavaksi kyseisen johdekappaleen koon pienentämistä. Aikaisemmat simulaatiot toistettiin tässä tapauksessa ja merkittäväksi tekijäksi osoittautui antureiden koon suhde niiden yläpuolelle sijoitetun johdekappaleen kokoon, mikä on varsin luonteva tulos levykondensaattorin peruslausekkeen valossa.

$$C = \epsilon_o \frac{A}{d} \quad (4.2)$$

Samat kokoon liittyvät simulaatiot toistettiin myös useilla muilla geometrioilla tulosten pysyessä samankaltaisina. Antureiden koon pienentäminen nykyisestä vaikuttaisi siis olevan ainakin pelkästään kytkeytymisen voimakkuuden perusteella järkevä valinta.

#### **4.2.2 Anturin muoto**

Koon lisäksi tässä työssä tutkittiin anturin erilaisten geometrioiden vaikutusta kytkeytymisen voimakkuuteen. Vertailukelpoisuuden vuoksi myös tässä tapauksessa simulaation perusgeometria säilytettiin samana ja anturit sijoitettiin betonitason päälle. Niiden väliin 20 mm etäisyydelle sijoitettiin edelleen 20 cm x 30 cm johdekappale.



**Kuva 9: Kaksi esimerkkiä tutkituista anturigeometrioista**

Eri geometrioiden merkityksen vaimentumiselle havaittiin olevan paljon pienemmän kuin antureiden koon merkityksen. Näin ollen anturin muoto voidaan perustellusti valita muiden vaatimusten pohjalta, joita ovat esimerkiksi peittävyys, valmistuksen helppous ja vaikutus RFID-silmukan suuntaavuuteen.

Taulukkoon kaksi on koottu tuloksen havainnollistamiseksi kolmelle eri anturi-toteutukselle saatuja heijastuskertoimien arvoja.

**Taulukko 2: Portin 1 heijastuskertoimien arvoja kolmella geometrialla ja kolmella eri koolla**

Anturin koko	ELSi-anturi 10.0	Kuuskulmio (kuva 7)	Sormikuviointi (kuva 7)
100 %	-0,386	-0,32	-0,371
75 %	-0,431	-0,41	-0,44
50 %	-0,5	-0,48	-0,51

### 4.3 RFID-toteutus

ELSI-järjestelmään liitettävää RFID-toteutusta on käsitelty tarkemmin Antti Ropposen diplomityössä. Kyky RFID-lähetykseen asettaa kuitenkin vaatimuksia myös antureille ja niiden antenniratkaisun suuntaavuudelle, jonka Ropposen työssä havaittiin olevan ongelma. Tässä työssä keskityttiin nimenomaan näihin ominaisuuksiin niiltä osin kuin se on tarpeen kokonaiskuvan muodostamiseksi antureille valittavasta toteutustavasta.



### 4.3.1 Yleiskatsaus RFID:n maailmaan

RFID, eli radiotaajuinen etätunnistus, tarkoittaa suurta joukkoa erilaisia tekniikoita, joille on yhteistä lukijan ja sen sähkömagneettisen kentän avulla lukeman tunnisteen käyttäminen. Vaikka menetelmän perusteet luotiinkin jo toisen maailmansodan aikana, on eri tekniikanalojen kehitys vasta viimeisen kymmenen vuoden aikana sallinut RFID:n tulon laajamittaiseen käyttöön.

Tällä hetkellä kehitys onkin hyvin nopeaa ja tekniikkaan on asetettu paljon toiveita ja odotuksia. Kirsi Siivola on diplomityössään käsitellyt laajasti paikannus ja tunnistus-teknologioiden käyttöä tulevaisuuden sairaalaympäristössä.

RFID-tunnisteet jaetaan passiivisiin, puoli-passiivisiin ja aktiivisiin:

Passiiviset tunnistetimet toimivat ilman omaa virtalähdettään saaden tarvittavan energian induktion avulla sitä lukevasta sähkömagneettisesta aallosta. Niiden hyviä puolia ovat pieni koko ja alhainen hinta. Oman virtalähteen puuttuminen rajoittaa kuitenkin niiden lukuetaisyttä ja sisältämän tiedon määrää.

Puoli-passiivissa tunnistetissa on oma virtalähde, mutta ei lähetintä. Tämä mahdollistaa suuremman joukon toimintoja ja pidemmän lukuetaisyyden hinnan pysyessä silti aktiivisia tunnistetia alhaisempana.

Aktiivisten tunnistetien sisältämät omat lähettimet mahdollistavat edelleen pidemmät, jopa kymmeniä metrejä olevat, lukuetaisyydet. Niiden hinta on kuitenkin luonnollisesti samalla korkeampi.

Koska ei ole olemassa kansainvälistä elintä, joka määritteli RFID-tekniikkaan liittyviä standardeja, vaihtelevat säännökset varsin paljon eri maiden välillä. Tärkeimmät taajuusalueet RFID:n kannalta ovat alle 135 kHz (19), koska tällä alueella on mahdollista käyttää korkeita magneettikenttien tehoja induktiivisesti kytkeytyvien RFID-järjestelmien kanssa, sekä eri ISM-alueet, jotka ovat niinkään vapaasti hyödynnettävissä.

**Taulukko 3: ELSI-järjestelmän kannalta olennaisia ISM-alueita (20)**

Taulukko 1. ISM-taajuudet (ITU-R, RR 5.150, Region 1)	
alaraja	yläraja
13553 kHz	13567 kHz
26957 kHz	27283 kHz
40,66 MHz	40,70 MHz
2400 MHz	2500 MHz
5725 MHz	5875 MHz
24 GHz	24,25 GHz

**Taulukko 4: Muita ELSI-järjestelmän kannalta kiinnostavia taajuusalueita (21)**

Alaraja	Yläraja	Huomioita
138,2 869,4	138,450 MHz 869,65 MHz	Toimintasuhde max. 10%. Teho max. 500 mW.
2,446 5,15 5,47 5,725	2,454 GHz 5,250 GHz 5,725 GHz 5,876 GHz	Toimintasuhde max. 15%. Vain sisätilat. Tarkoitettu etätunnisteille. Suomessa. Efek. lähetysteho max. 200 mW. Vain sisätilat Suomi ja useimmat Euroopan maat. Efek. lähetysteho max. 1 W. Euroopan maissa. Teho max. 25 mW

### 4.3.2 Silmukan koko, muoto ja suuntaavuus

Kuten edellä on käynyt ilmi antureiden kytkeytymisen niiden näkemään kohteeseen ei simulaatioissa havaittu asettavan käytännössä vaatimuksia niiden muotoilulle. Niinpä antennin toteutustapaa rajoittavat muut tekijät kuten rakenteen rajoittuminen kahteen dimensioon ja antennia syöttävien johdinten sijoittelu.

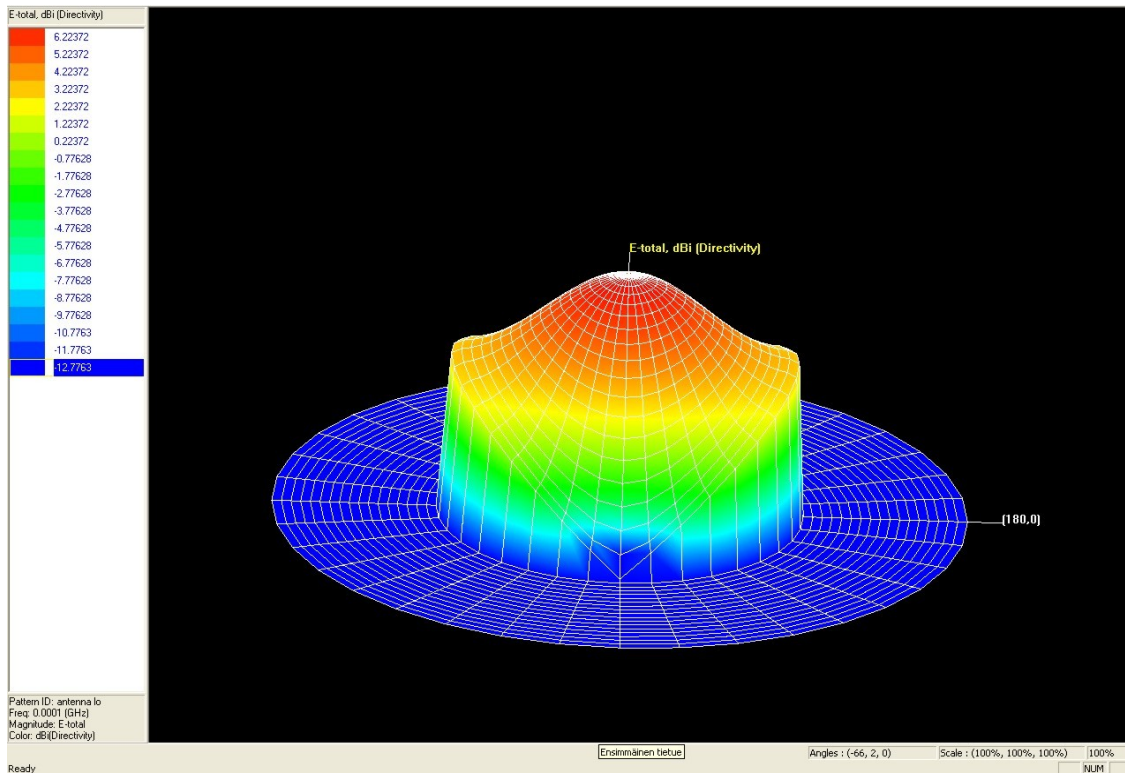
Erilaisia antennivaihtoehtoja tutkittaessa kävi selväksi, että yksinkertaisen tasoratkaisun tapauksessa tälläkin hetkellä käytössä olevalle tavalliselle silmukka-antennille olisi erittäin vaikea löytää korvaajaa, jonka toteuttaminen olisi käytännöllistä. Niinpä ensimmäiseksi lähestymistavaksi valittiin sen selvittäminen millainen suuntaavuus tällaisella silmukka-antennilla voitaisiin saavuttaa vallitsevissa olosuhteissa.

Silmukka-antennin suuntaavuuden kannalta avainasemassa on sen kehän pituus suhteessa käytettyyn aallonpituuteen. Antti Ropposen diplomityössä toteutetussa järjestelmässä käytetään 100 kHz taajuutta. Tällä taajuudella aallonpituudeksi saadaan noin kolme kilometriä (kaava 4.3), eli ollaan tilanteessa, jossa mitoiltaan 44cm x 48cm oleva antenni on hyvin pieni aallonpituuteen verrattuna ja sen virtajakauma on lähes vakio paikan suhteen.

$$c = \lambda * f \quad (4.3)$$

Tällaisen antennin suuntakuvion maksimi on silmukan tasossa ja nollakohdat kohtisuorassa silmukkaa vastaan. Suuntakuviota on siis muuten samanlainen kuin sähköisen dipolin paitsi, että sähkö- ja magneettikentät vaihtavat paikkaa keskenään (22).

Koska todellisessa tilanteessa käytettävä silmukka-antenni on sijoitettuna useimmiten betonilattialle simuloitiin tämäkin tilanne lisäksi IE3D-simulaatio-ohjelmistoa hyväksikäyttämällä. Kuvassa 9 näkyy antennin suuntaavuus.



**Kuva 9: 48cmx44cm silmukka-antennin suuntaavuus 100 kHz taajuudella.**

Seuraavaksi siirryttiin tutkimaan tilannetta, jossa käytetään niin suuria, vähintään kymmenien megahertsien taajuuksia, että silmukka-antenni on käytettyyn aallonpituuteen verrattuna suuri. Tällaisen silmukan virta ei ole vakio paikan suhteen ja suuntakuviot on aivan erilainen verrattuna pienen silmukan tapaukseen. Jos kehän pituus on esimerkiksi yksi aallonpituus, maksimi on kohtisuorassa kehän tasoa vastaan ja nollakohta kehän tasossa (23).

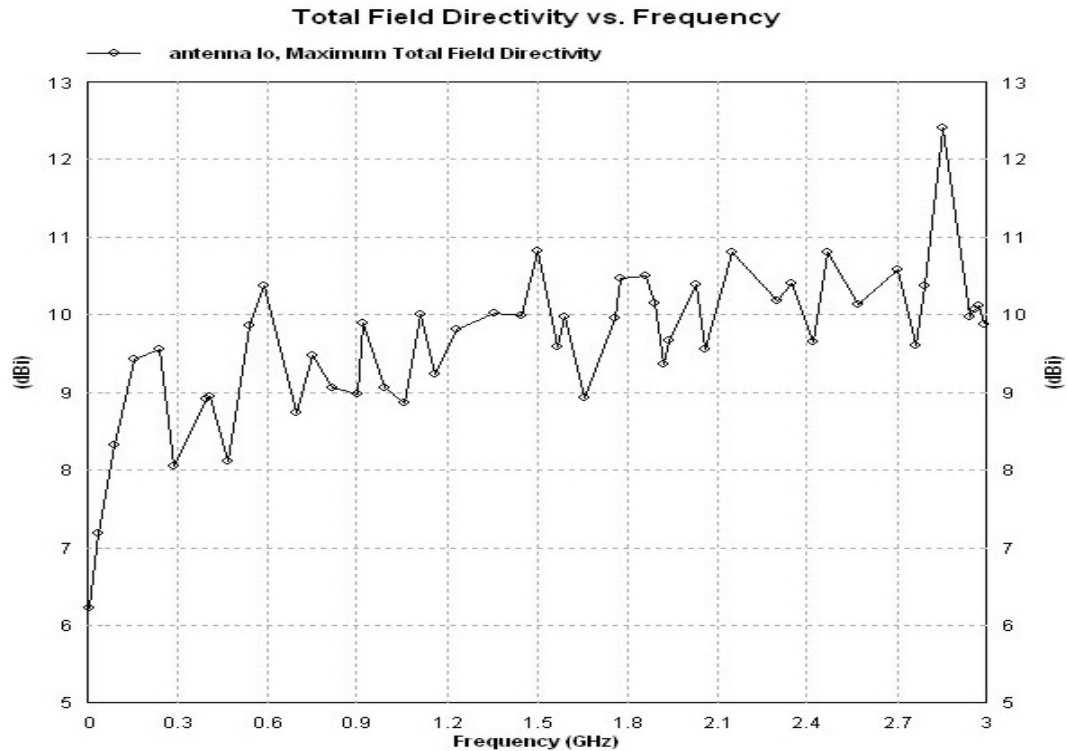
Kaukokentän raja saadaan yhtälöstä 4.4 (24). Nähdään siis, että siirryttäessä korkeille taajuuksille siirrytään samalla myös tilanteeseen, jossa tunnistetien käyttöetäisyys sijaitsee lähikentän puolella. Tässä tapauksessa  $L$  on  $2 \cdot 0,44\text{m} + 2 \cdot 0,48\text{m} = 1,84\text{ m}$ . Siispä esimerkiksi 40 MHz taajuudella kaukokentän raja on n. 7,50 m.

$$r = \frac{2L^2}{\lambda} \quad (4.4)$$

Koska antennia syöttävien johdinten sijoittelussa ei ole käytännön syistä mahdollista toteuttaa kovin monimutkaisia ratkaisuja (25), vaihtelee signaalin vaihe antennin eri osien välillä. Tällaisessa tilanteessa suuntaavuus ei ole yksinkertaisesti laskettavissa vaan ollaan pakotettuja turvautumaan simulaatioihin. Tässäkin tapauksessa niihin käytettiin

IE3D-simulaatio-ohjelmistoa.

Ensimmäiseksi simuloitiin antennin suuntaavuus alueella 0-3 GHz. Tälle alueelle sijoittuu suurin osa sovelluksen kannalta kiinnostavista ISM-alueista.



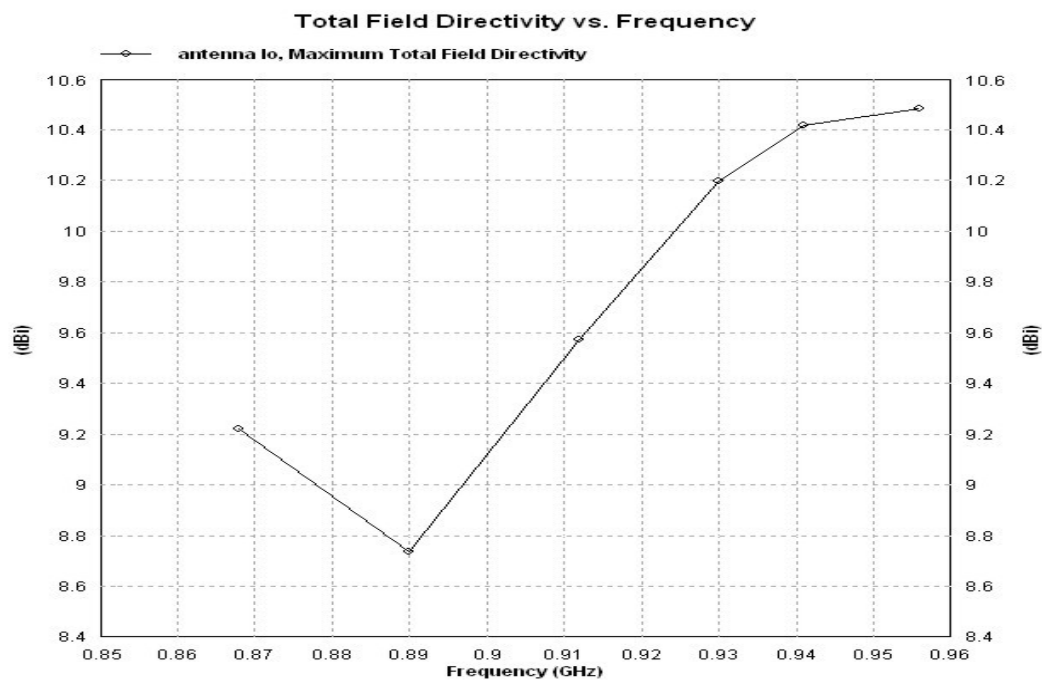
**Kuva 10: 48cmx44cm silmukka-antennin kokonaissuuntaavuus taajuualueella 0-3 GHz.**

Kuten kuvaajasta nähdään antennin suuntaavuus nousee voimakkaasti taajuuden noustessa, mutta gigahertsialueella sen pysyttelee samalla tasolla vaihtelun ollessa kuitenkin merkittävää.

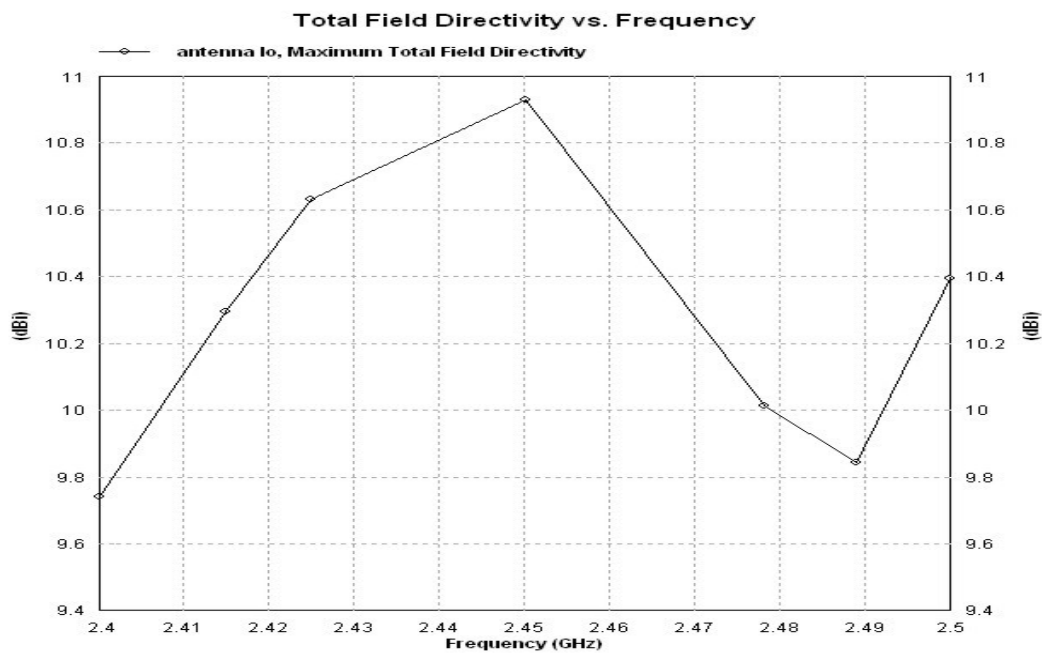
Seuraavaksi otettiin tarkempaan tarkasteluun varsin laajasti käytettävät ISM-alueet taajuuskaistoilla 868-956MHz ja 2,4-2,5GHz.

Näistä nähdään, että suuntaavuuden huiput löytyvät taajuuksien 0,95 GHz ja 2,45 GHz tuntumasta, joten suuntaavuuden ja sähkökenttien kuviot näillä taajuuksilla ovat erityisen kiinnostavia.

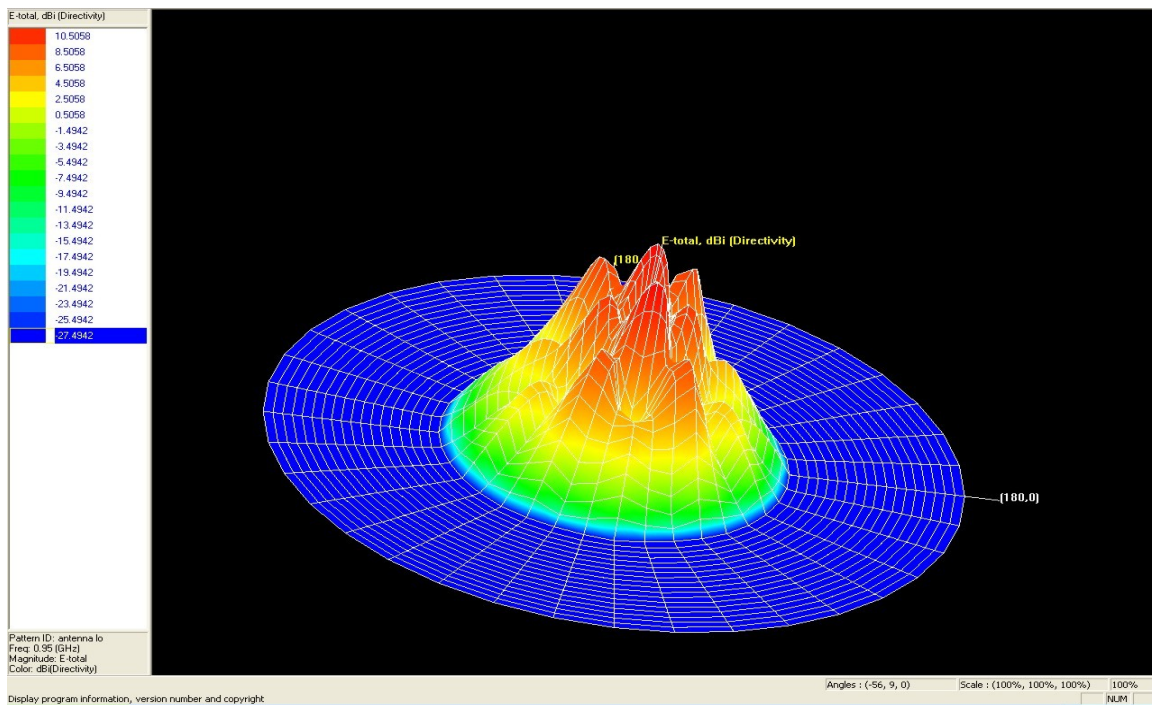
Nähdään, että nostamalla taajuutta päästään n. 4,7 dB parempaan kokonaissuuntaavuuteen kuin kuvan 9 tapauksessa. Tämä tarkoittaa siis noin kolminkertaista suuntaavuutta verrattuna kyseiseen tilanteeseen, jossa aallonpituus on suuri verrattuna silmukan kokoon.



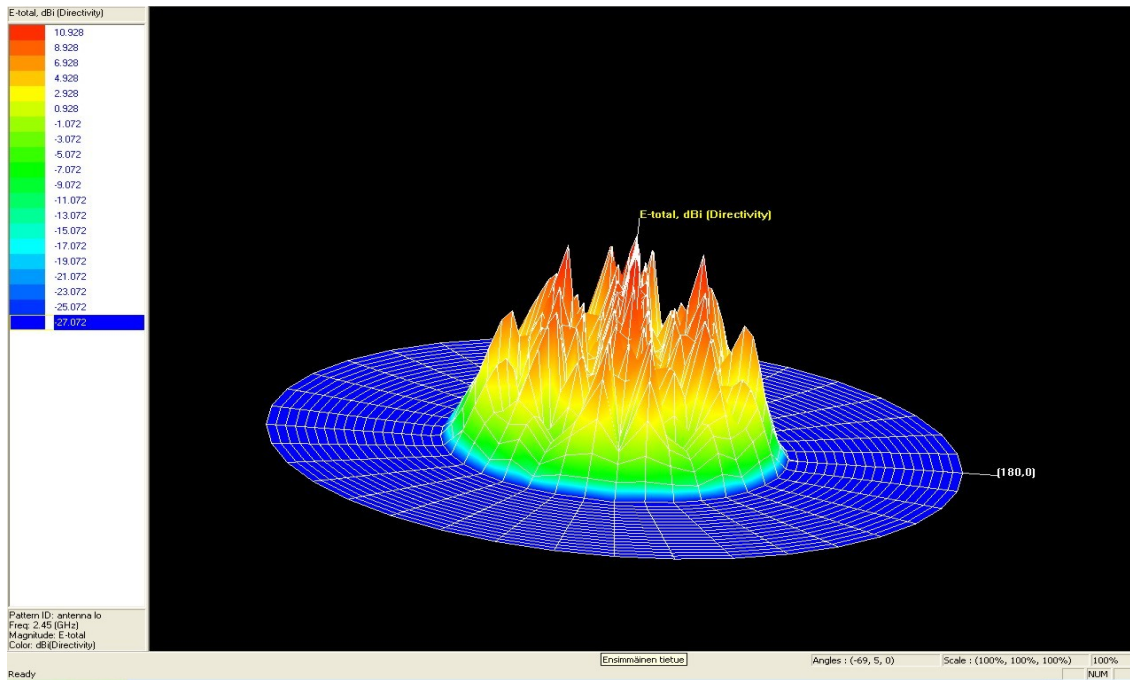
Kuva 11: 48cmx44cm silmukka-antennin suuntaavuus taajuualueella 868-956MHz.



Kuva 12: 48cmx44xm silmukka-antennin suuntaavuus taajuualueella 2,4-2,5 GHz.



Kuva 13:48cmx44cm silmukka-antennin suuntaavuus taajuudella 0,95 GHz.



Kuva 14: 48cmx44cm silmukka-antennin suuntaavuus taajuudella 2,45 GHz.

## **4.4 Guard-järjestelmästä ja patch-antennista toteutuksen vaihtoehtona**

### **4.4.1 Guardista yleisesti**

Yhtenä vaihtoehtona nykyisenkaltaisella anturijärjestelmälle on esitetty guardin käyttöä. Tällä tarkoitetaan järjestelmää, jossa varsinaisten anturiruutujen alapuolelle on sijoitettu johtava taso, jonka suhteen mittaukset tehdään. Tämän johdetason ansiosta kenttä saadaan suuntautumaan puhtaasti ylöspäin, jolloin nykyisen menetelmän suurin ongelma, eli kentän kytkeytyminen pääasiassa lattiaraudoitukseen, saadaan vältettyä. Jopa verrattuna tilanteeseen, jossa lattiaraudoitusta ei esiinny, on ylöspäin suuntautuva kenttä siis kaksinkertainen tällä menetelmällä.

Guardin käyttöön liittyy kuitenkin myös ongelmia, joiden takia siihen ei ole ainakaan toistaiseksi päädytty. Ensinnäkin kahden tason käyttäminen tekee järjestelmän asentamisesta huomattavasti monimutkaisempaa ja vaikeampaa, eikä menetelmä sovellu esimerkiksi sänkyjärjestelmän pohjaksi. Lisäksi mittausten tekeminen guard-tason suhteen vaatii hyvin toimiakseen todella järeän maatasen, jollaisen toteuttaminen saattaisi useimmissa kohteissa olla hyvin vaikeaa, jos ei mahdotonta.

Guardia hyödyntävästä järjestelmästä on olemassa yksi esimerkki, eli Sovelletun elektroniikan laboratorion Mummon mökki (25), joka toteutettiin ennen nykyiseen menetelmään siirtymistä.

Vaikka guard-vaihtoehdon tarkempi tutkiminen jääkin tämän diplomityön ulkopuolelle, käsitellään seuraavassa yhtä siihen soveltuvaan RFID-antennitoteutusta esimerkkinä kaksitasoratkaisusta, joka ei vaadi erillistä antennin sisällyttämistä anturigeometrian osaksi.

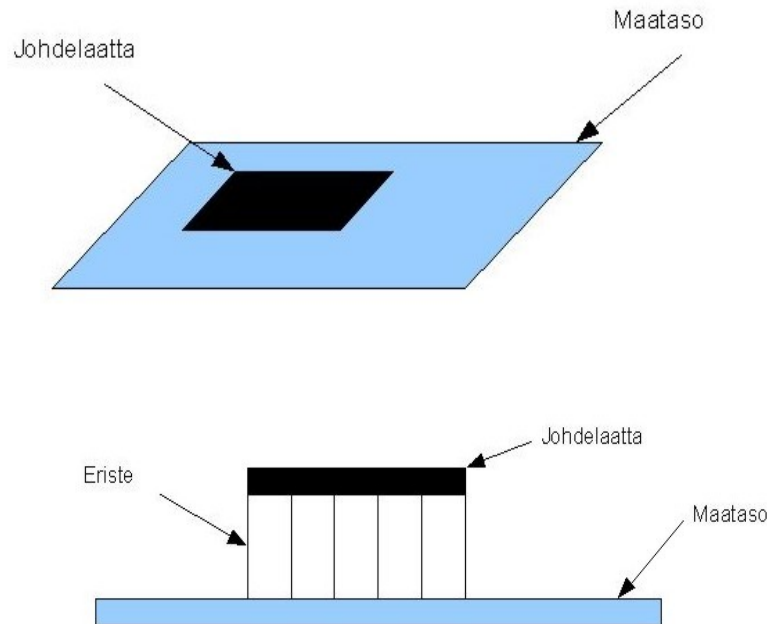
### **4.4.2 Patch-antennin käytöstä guard-järjestelmän osana**

Vaikka kävikin selväksi, että pelkällä silmukka-antennilla voitaisiin päästä huomattavasti nykyistä suurempaan suuntaavuuteen järjestelmän tämän hetken toteutuksen puitteissa pelkästään käytettyä taajuutta nostamalla, päätettiin selvittää vielä millainen toteutustapa soveltuisi tilanteeseen, jossa olisi käytettävissä kaksi tasoa. Tämä on kiinnostava kysymys ennen kaikkea mahdollisen guard-toteutuksen kannalta.

Anturien kannalta olennaista on vaatimus niiden alla sijaitsevasta johdetasosta, jonka suhteen mittaukset tehdään. Tarkasteltaessa erilaisia kahteen tasoon sijoittuvia antennivaihtoehtoja kävi selväksi, että parhaiten geometria soveltuisi patch-antennin (26) toimintaperiaatteen hyödyntämiseen.

Patch-antennit ovat suosittu antennityyppi yli 100 MHz taajuuksissa, joilla aallonpituus on alle kolme metriä. Ne rakentuvat johdelevystä, joka sijaitsee maatasen

yläpuolella välitilan ollessa jonkin eristemateriaalin täyttämää. Tämä vastaa siis täysin guard-järjestelmän tilannetta.



**Kuva 15: Yksinkertaisen patch-antennin rakenne**

Tyypillisesti nelikulmion muotoisen antennilevyn lyhyempi sivu valitaan puolen aallonpituuden mittaiseksi, koska tällöin pituus vastaa resonanssissa olevan dipolin pituutta, jolloin antennin vahvistus kasvaa.

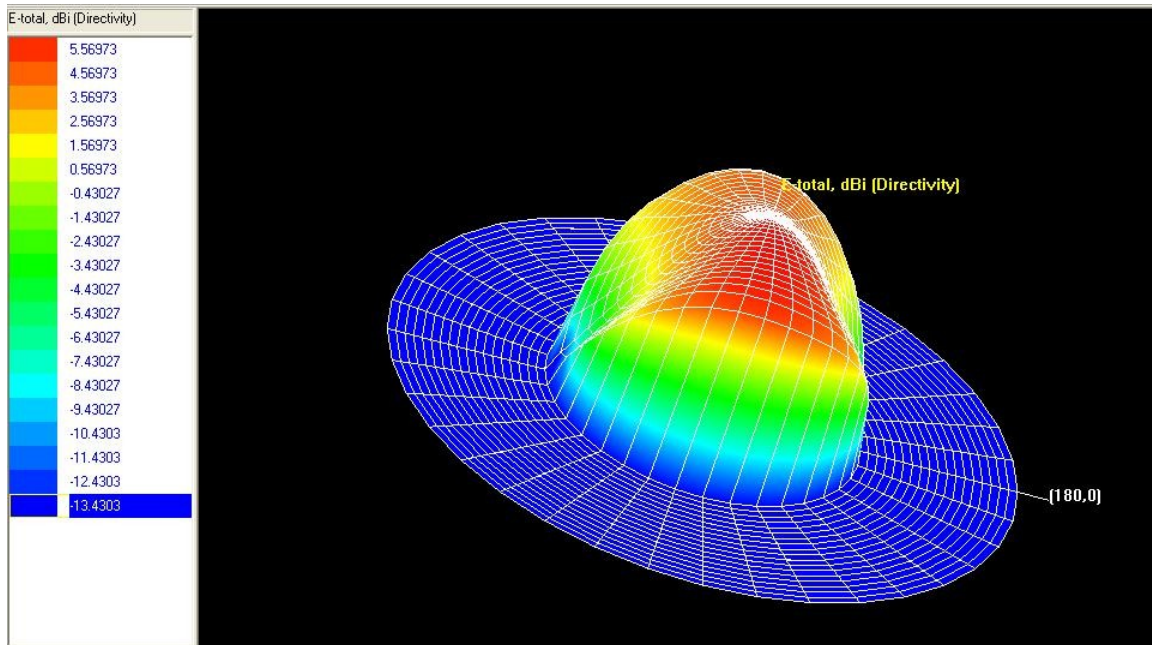
ELSI-antureiden kokoluokan kannalta sopivin Euroopan alueella käytettävissä oleva ISM-taajuuskaista sijaitsee välillä 433,05-434,79 MHz. Keskitäajuudella 433,92 MHz aallonpituudeksi saadaan noin 0,69 m. Tällöin anturilevyn lyhyemmän sivun tulisi siis olla 0,345 m, joka on vain hieman enemmän kuin anturimaton versiossa 10.0 käytetty arvo 0,29 m.

Seuraavaksi tutkittiin tällaisen antennin toimintaa simuloimalla. Simulaatiossa johdelevyn oletettiin sijaitsevan 5 mm etäisyydellä sen alapuolella olevasta johdetasosta välitilan ollessa yksinkertaisesti tyhjää ilmaa.

Kuvan 16 434 MHz taajuudella lasketusta suuntaavuuskuvioista nähdään, että tällaisen patch-antennin suuntaavuus on samaa luokkaa kuin tällä hetkellä käytössä olevassa ELSI-järjestelmän RFID-toteutuksessa. Tällaisen järjestelmän suuntaavuutta ei kuitenkaan ole mahdollista parantaa taajuutta nostamalla kuten silmukka-antennin tapauksessa, joten peittoalueen pienentämiseksi jäisi keinoista käytettäväksi lähinnä käytetyn tehotason alentaminen.



Simulaatio kuitenkin osoitti, että guard-toteutuksessa pelkkää anturia voidaan käyttää antennina ilman, että siihen on sisällytetty esimerkiksi erillistä silmukkaa sitä varten.



Kuva 16: Patch-antennin suuntaavuus taajuudella 434 MHz.

## **5 Mittauselektroniikkavaihtoehtojen vertailu**

Tämän diplomityön puitteissa suoritettiin tällä hetkellä olemassa olevien elektroniikkatoteutusten vertailu lattianturijärjestelmän osana. Aikaisemmin systemaattista tutkimusta järjestelmän kehityksen aikana syntyneiden toteutusten suorituskyvystä verrattuna toisiinsa ei oltu juurikaan tehty. Se on kuitenkin välttämätöntä tulevan kehitystyön suuntaviivojen määrittämiseksi ja eri toteutusten vahvuuksien sekä heikkouksien ymmärtämiseksi.

### **5.1 Vertailtavat elektroniikat**

Vertailussa oli mukana neljä korttia, jotka edustavat kolmea eri mittausmenetelmää.

#### **5.1.1 MCU V5**

Tämä on Henry Rimmisen diplomityössään suunnitteleman mittauselektroniikan kirjoitushetkellä käytössä oleva versio. Tämä elektroniikkatoteutus on ainoa, joka kykenee tällä hetkellä varsinaiseen elintoimintosiinaalien mittaamiseen. Tämä toteutetaan vaiheherkän mittauksen jälkeen suoritettavalla signaalin voimakkaalla suodattamisella ja vahvistamisella.

#### **5.1.2 Relaksaatiokortti**

Niinikään Henry Rimmisen käsialaa oleva elektroniikkavaihtoehto. Kyseisessä kortissa mittaus perustuu relaksaatioperiaatteeseen, eli kapasitanssien purkautumisaikojen mittaamiseen. Testeissä käytetty kortti oli toteutukseltaan vasta alustava versio eikä itse mittausperiaatteen todellisesta suorituskyvystä tule näin ollen tehdä johto-päätöksiä saatujen tulosten perusteella vaan ne koskevat ainoastaan tätä kyseistä elektroniikkatoteutusta.

#### **5.1.3 Sänkyanturijärjestelmän mittauselektroniikka**

Tämä elektroniikkavaihtoehto toteutettiin alunperin aikanaan Tuukka Kuuranmaan toimesta ELSI-sänkyanturijärjestelmää varten. Sen mittausperiaate ei perustu erilliskomponenteista rakennettuun toteutukseen vaan Analog Devicen mikrokontrolleriin AD7142, joka on erityisesti suunniteltu kapasitiivisia mittauksia varten.

#### **5.1.4 MCU V6**

Tämä on Henry Rimmisen suunnittelema versio tällä hetkellä käytössä olevasta mittauselektroniikasta, joka käyttää kymmenkertaista käyttöjännitettä. Tämän kortin toteutuksen taustalla on professori Raimo Sepposen esittämä hypoteesi siitä, että

nostettaessa jännitettä varsinainen signaali vahvistuu kohinaa enemmän, jolloin päästään parempaan signaalikohinasuhteeseen.

Hypoteesi sai jo ennen tässä selostettuja vertailuja vahvistusta Henry Rimmisen ja allekirjoittaneen tekemistä piirisimulaatioista. Lisäksi Elsi Technologies Oy oli suorittanut testejä ns. heräteboosterilla. Tämä boosteri on Henry Rimmisen laatima piiri, joka poistaa DC-komponentin herätesignaalista, aiheuttaa siihen 180 asteen vaihesiirron ja vahvistaa tuloksen kaksinkertaiseksi.

Tämä muokattu signaali johdettiin kokeissa sivuelektrodiin, mikä kasvattaa kyseisen sivuelektrodin ja mittaavan anturin välistä jännitettä. Tulokset olivat erittäin lupaavia, vaikkakin pienen koemäärän takia niihin suhtauduttiin varauksella.

## 5.2 Askelmittaus

### 5.2.1 Mittausjärjestelyt

Mittaus suoritettiin käyttäen apuna kuvan 17 tekojalkoja, jotka simuloivat anturin päälle astuvaa ihmistä. Itse mittaus suoritettiin seuraavalla tavalla:

- 1) Ensimmäisessä vaiheessa mitattiin noin kymmenen sekunnin ajan anturia tilanteessa, jossa sen yläpuolella ei ollut muuta kuin ilmaa. Tällä tavalla saatiin kustakin anturista kohina, johon varsinaista askelvastetta voitiin verrata.
- 2) Seuraavassa vaiheessa mittauksen edelleen jatkuessa tuotiin tekojalat anturin päälle nopeasti asettamalla, jotta tilanne vastaisi anturin päälle astuvaa ihmistä. Mitattavan anturin kohdalla jalka oli säädetty 10 mm korkeudelle ilmaan, kun taas viereisen anturin päällä oleva jalka oli kiinni anturissa.

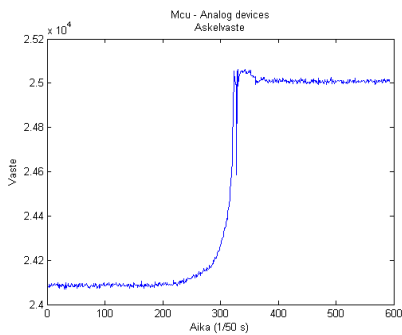
Näin saaduista askelvasteista laskettiin edelleen signaalikohinasuhde.



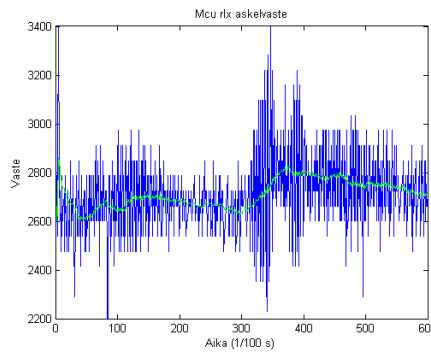
Kuva 17: Tekojalat, joita käytettiin testeissä.

## 5.2.2 Tulokset

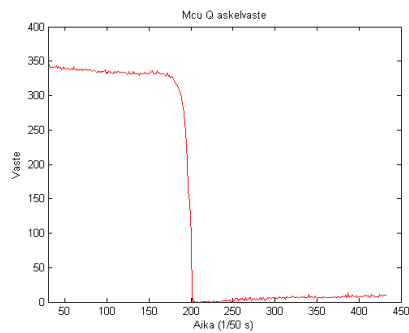
Muutamia mittauksia jouduttiin hylkäämään niiden epäonnistumisen takia. Odotetusti uusi korkeajännitekortti suoriutui testistä parhaiten. Toiseksi tuli sänkyanturijärjestelmän elektroniikka ja kolmanneksi nykyisin käytössä oleva lattia-anturijärjestelmän elektroniikka. Relaksaatiokortin tulokset olivat erittäin heikkoja ja niitä oli useimmissa mittauksissa hyvin vaikea ylipäänsä erottaa kohinasta, mutta johtuen toteutuksen keskeneräisyydestä ei tästä voida tehdä johtopäätöksiä koskien varsinaista mittaus-periaatetta.



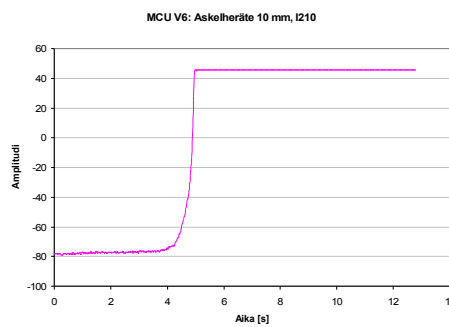
Kuva 18: MCU AD askelvaste



Kuva 19: Relaksaatiokortin askelvaste



Kuva 20: MCU V5 askelvaste.



Kuva 21: MCU V6 askelvaste

Taulukko 5: Tehtyjen testien perusteella lasketut signaalikohinasuhteet eri elektroniikoille.

Kortti	MCU V5	MCU RLX	MCU AD	MCU V6
Keskiarvo	40.11 dB	3.51 dB	43.21 dB	46.51 dB

## 5.3 Simuloidun sydämen sykkeen mittaaminen

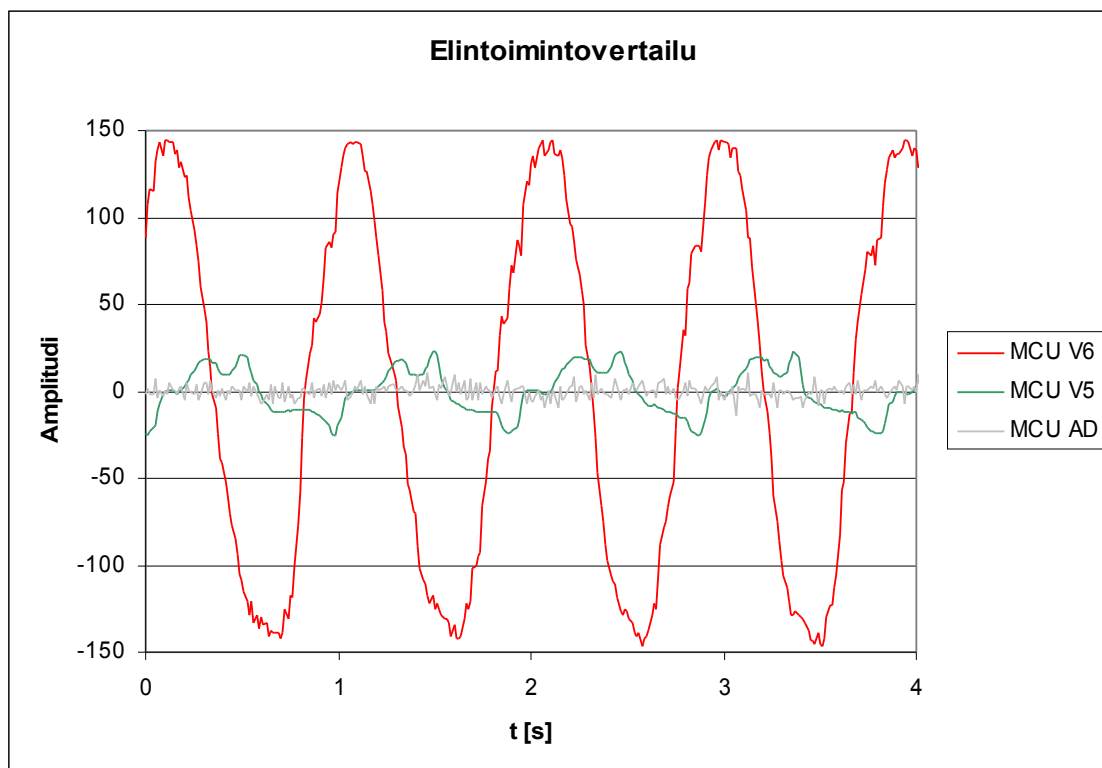
### 5.3.1 Mittausjärjestelyt

Vertailun tässä osuudessa pyrittiin selvittämään sitä miten eri elektroniikkavaihtoehdot selviäisivät simuloidun sydämen sykkeen mittaamisesta. Simulaattorina toimi Atiny13-mikroprosessori, joka tuottaa sinisignaalin mukaista vaihtuvaa impedanssia jalkojen välille 1 Hz taajuudella.

Tämä testi suoritettiin seuraavalla tavalla:

- 1) Ensimmäisessä vaiheessa tekojalat asetettiin antureiden päälle niin, että toinen jaloista oli 10 mm korkeudella anturin yläpuolella ja toinen jalka kiinni viereisessä anturissa. Mittaamalla antureita tällä asetelmalla ilman sydänsimulaattoria saatiin jälleen arvo antureiden kohinalle.
- 2) Seuraavassa vaiheessa sydänsimulaattori kytkettiin päälle ja suoritettiin varsinainen mittaus kyseisestä anturista.

### 5.3.2 Tulokset



Kuva 22: Tehtyjen testien perusteella laaditut amplitudikäyrät eri korteille sydänsimulaatioista.

**Taulukko 6: Tehtyjen testien perusteella lasketut signaali-kohina-suhteen sydänsimulaatiomittauksille.**

Tulokset	Signaali	Kohina	Suhde	dB
MCU V5	13.07637	4.146208	3.153814	9.98 dB
MCU V6	67.43765	2.741419	24.59954	27.82 dB
MCU AD	5.906015	5.937891	0.994632	-0.05 dB

Kuvassa 22 näkyvät eri korttien sydänsimulaatiotulokset. Taulukossa 6 ovat korttien signaali-kohina-suhteet. Ne on laskettu vertaamalla kunkin kortin kohinan deviaatiota signaalin deviaatioon. Sänkyelektroniikan (MCU AD) tulokset ovat erittäin heikkoja puuttuvan paluukanavan takia.

Kuten taulukosta ilmenee signaalikohinasuhteen ero tällä hetkellä käytössä olevan elektroniikan (MCU V5) ja korkeajännitekortin (MCU V6) välillä on huimat 17,84 dB. Tämä ero on niin valtava, että se vaatisi uusintamittauksia tulosten varmentamiseksi, mutta korkeajännitekortin hajoamisen vuoksi tämä jää jatkokehityksen piiriin.

Joka tapauksessa mittausten tulokset olivat korkeajännitteisemmän herätesignaalin osalta erittäin positiivisia. Myös sänkyelektroniikan hyvä pärjääminen askelvastetestissä on huomionarvoinen tulos. Relaksaatiokortin osalta johtopäätösten tekeminen jää myöhempään ajankohtaan johtuen elektroniikkatoteutuksen keskeneräisyydestä.

## 6 Järjestelmän käyttöönotossa ilmenneitä ongelmia

ELSI-järjestelmän kehitys on tällä hetkellä edennyt vaiheeseen, jossa meneillään on useita pilottiprojekteja. Niiden myötä järjestelmän toiminnasta käytännössä on saatu arvokasta tietoa ja samalla ollaan luonnollisesti törmätty myös ongelmiin, jotka vaativat ratkaisemista.

Tässä diplomityössä pyrittiin sen tavoitteiden mukaisesti etsimään ratkaisuja osaan tällaisista esiin tulleista ongelmakohdista. Käsitellyt ongelmat pyrittiin valitsemaan niiden koko järjestelmän käytölle aiheuttaman haitan perusteella.

### 6.1 Askelvaimennus ja varauksen kertyminen

Yhdessä ELSI-järjestelmän pilottikohteista Lahdessa törmättiin erikoiseen ilmiöön, jossa anturimatot saattoivat yhtäkkiä ilman varoitusta mennä punaiselle aivan kuin niiden lähettyville olisi ilmestynyt kookas johtava kohde, vaikka mikään ympäristössä ei ollut muuttunut.

Asiasta tehtiin hypoteesi, jonka mukaan lattian laminaattipäällysteen ja sen alla olevan askelvaimennuskerroksen väliin syntyi mekaanisen rasituksen seurauksena varauksia, jotka eivät päässeet purkautumaan. Nämä kelluvat varaukset saattoivat sitten ennustamattomalla ajanhetkellä tulla järjestelmän näkyviin samalla tavalla kuin antureiden yläpuolelle ilmaantuva johdekappale.

Tavoitteeksi otettiin ilmiön saaminen esiin laboratorio-olosuhteissa ja käytännöllisen ratkaisun löytäminen sen poistamiseksi. Tätä varten Sovelletun elektroniikan laboratorion testihuoneeseen rakennettiin oikeaa tilannetta vastaava koejärjestely.



**Kuva 23:** Kuva Sovelletun elektroniikan laboratorion testihuoneesta. Kuvassa laminaattipäällystettä anturimattojen päällä.



Ilmiön esille saaminen osoittautui lopulta varsin aikaavieväksi tehtäväksi, vaikka se olikin teknisesti hyvin yksinkertaista. Ilmiön erittäin satunnaisen luonteen vuoksi sen esiintymistä ei voitu ennustaa, mutta lisäämällä laminaattilevyjen liikkumavaraa esiintymistiheyttä pystyttiin kuitenkin kasvattamaan sellaiselle tasolle, että tutkimus oli mahdollista saada tehtyä.

Varsinainen testaus tehtiin yksinkertaisesti lattialla kävelemällä ja aiheuttamalla muulla tavoin laminaattilevyjen mekaanista hankausliikettä toisiaan ja alla olevaa askeläänieristyskerrosta vasten. Testin ensimmäistä vaihetta jatkettiin niin kauan kunnes ilmiö oli saatu rekisteröityä kymmenen kertaa. Sen jälkeen siirryttiin selvittämään sitä saataisiinko se poistettua. Tähän oli esitetty kahta ratkaisua.

Ensimmäisessä laminaattilevyjen ja askelvaimennuskerroksen väliin sijoitettiin ohutta ESD-kalvoa, jonka tehtävänä oli johtaa varaukset pois niin, etteivät ne pääsisi kerääntymään ja aiheuttamaan ongelmia.



**Kuva 24: ESD-kalvorulla.**



**Kuva 25: Parkolag-askeläänieristysmateriaalia.**

Toisessa vaihtoehdossa askelvaimennuskerroksen materiaali korvattiin sellaisella, jonka ei uskottu aiheuttavan varausten kerääntymistä. Tällaiseksi materiaaliksi valittiin parkolag niminen tuote.

ESD-kalvon tapauksessa ilmiö rekisteröitiin kerran, mutta koska sitä ei pitkällisistä kokeista huolimatta saatu uusittua jäi epäselväksi oliko kyseessä mahdollisesti jokin muu häiriö. Parkolagin tapauksessa ilmiötä ei saatu lainkaan esiin mikä oli varsin hyvä tulos. Koska parkolagin käyttäminen on myös käytännössä varmasti helpompaa kuin erillisen ESD-kalvon asentaminen kohdekiinteistöihin, voidaan todeta olevan perusteltua siirtää sen käyttöön tulevilla hankkeilla.



**Taulukko 7: Häiriöilmiön esiintyminen koetilanteessa eri lattiamateriaaliyhdistelmille**

Materiaalit	Havaittujen häiriöiden lukumäärä
Laminaatti ja äe1	10
Laminaatti ja äe2	0
Laminaatti , ESD-kalvo ja ae1	1
Parkettila ja äe1	0

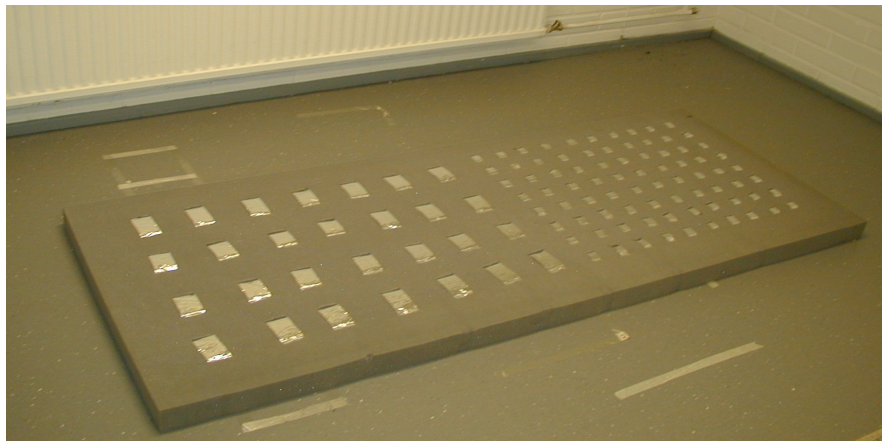
Taulukossa äe1 tarkoittaa tavallista äänieristyskalvoa ja äe2 parkolagin äänieristysmateriaalia.

## **6.2 Elintoimintosihtinaalin mittaaminen patjan läpi**

### **6.2.1 Sähkökentän johtaminen patjan läpi**

Toinen tässä työssä käsiteltävä ongelma koskee elintoimintosihtinaalin mittaamista patjan läpi. Lohjan pilottikohteessa on havaittu, että tavallinen vaahtomuovipatja estää lattia-antureita näkemästä lainkaan patjalla makaavaa henkilöä. Koska kyseisessä pilottikohteessa ELSI-järjestelmää käytetään selviämishuoneeseen sijoitettujen potilaiden, jotka viettävät suuren osan ajasta patjalla maaten, tarkkailuun, on ilmennyt puute kriittinen järjestelmän toiminnan kannalta.

Koska ratkaisu ongelmaan tarvittiin suhteellisen nopealla aikataululla, ei sitä voitu lähteä hakemaan itse mittauselektroniikkaan tehtävien muutosten kautta. Niinpä lähtökohdaksi otettiin sähkökentän johtaminen patjan läpi. Tämä päätettiin toteuttaa käyttäen hyödyksi alumiiniteippiä, koska joustavana materiaalina siitä valmistettujen johtimien sijoittaminen patjaan ei vaikuttaisi merkittävästi sen käyttömukavuuteen.



**Kuva 26: Ensimmäinen versio patjasta. Patjan vasemmalla puolella näkyvät käytetyt suuremmat johdealueet.**

Alustavien mittausten vaikuttaessa lupaavilta menetelmän toimivuuden kannalta päätettiin rakentaa varsinainen koepatja, joka näkyy kuvassa. Patjan läpi vedettyjen johdealueiden suuruuden vaikutuksesta ei ollut aluksi tietoa, joten tässä ensimmäisessä versiossa ne jätettiin työmäärän vähentämiseksi kohtuullisen suuriksi.

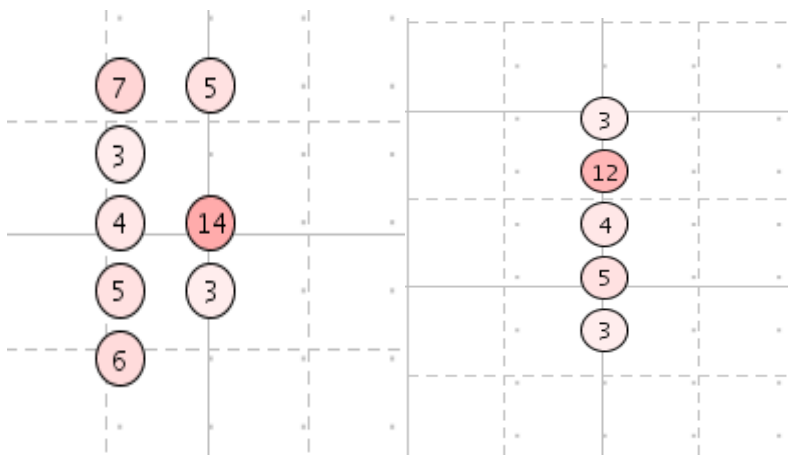
Patjalla suoritettiin iso joukko mittauksia, joista pystyttiin tekemään johtopäätöksiä. Ensinnäkin havaittiin, että itse patjalla makaava henkilö näkyi mittauksissa varsin hyvin, mikä oli jo itsessään merkittävä edistysaskel lähtötilanteeseen verrattuna.

Toinen tehty havainto oli, että elintoiminnoista peräisin olevien alhaisten taajuuskomponenttien näkyminen mitatun signaalin spektrissä vaihteli hyvin paljon mittausten välillä eikä ollut sidoksissa antureiden havaitseman kohteen voimakkuuteen.

Kolmas havainto oli, että itse johdealueilla varustetun patjan näkyminen vaihteli hyvin paljon patjan sijainnin mukana lattialla, ja että elektroniikan herkkyys asialle itsessään ei pysynyt vakiona vaan siinä oli merkittäviä vaihteluita ajan suhteen, jotka eivät poistuneet kalibrointia käyttämällä.

Koska menetelmä osoittautui kuitenkin varsin lupaavaksi, päätettiin sen kehittämistä jatkaa edelleen. Elsi Technologiesin toimesta patjasta valmistettiin toinen versio (kuva 25), jossa käytettiin pinta-alaltaan pienempiä johdealueita. Aikaisemmalla patjalla tehtyjen mittausten perusteella pienemmillä ruuduilla saatiin 16,9% parempi signaali.

Pienempää ruutukokoa käyttämällä pelkän tyhjän patjan näkyminen järjestelmässä on saatu niinikään putoamaan merkittävästi, jopa 75%. Tämä tulos oli saatu laskemalla yhteen Elsi-järjestelmän näkemien kohteiden voimakkuuksia ja johtamalla niistä hyvyysluku kummallekin tapaukselle.



Kuva 27: Kuvat järjestelmän näkemästä patjasta kahdessa eri tilanteessa.

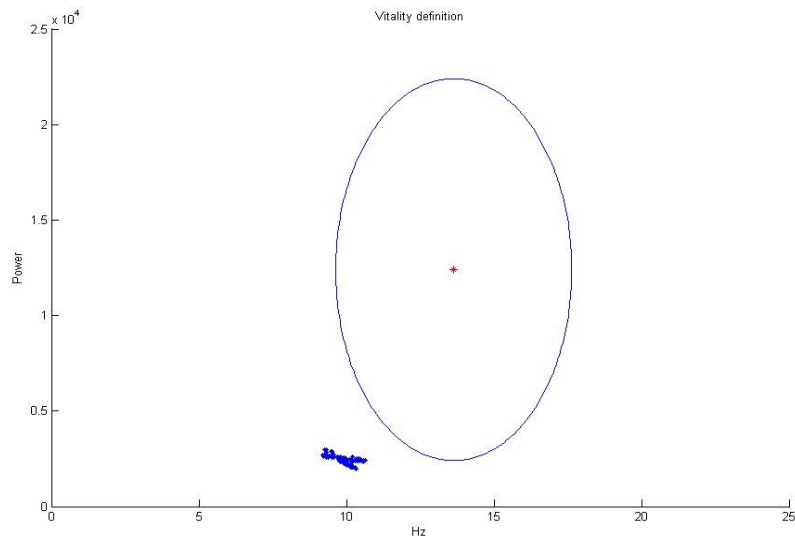
$$arvo = \sum (mittaus_i + 10) \quad (6.1)$$



Kuva 28: Lohjan terveyskeskuksen tarpeisiin valmistettu patjan seuraava versio.

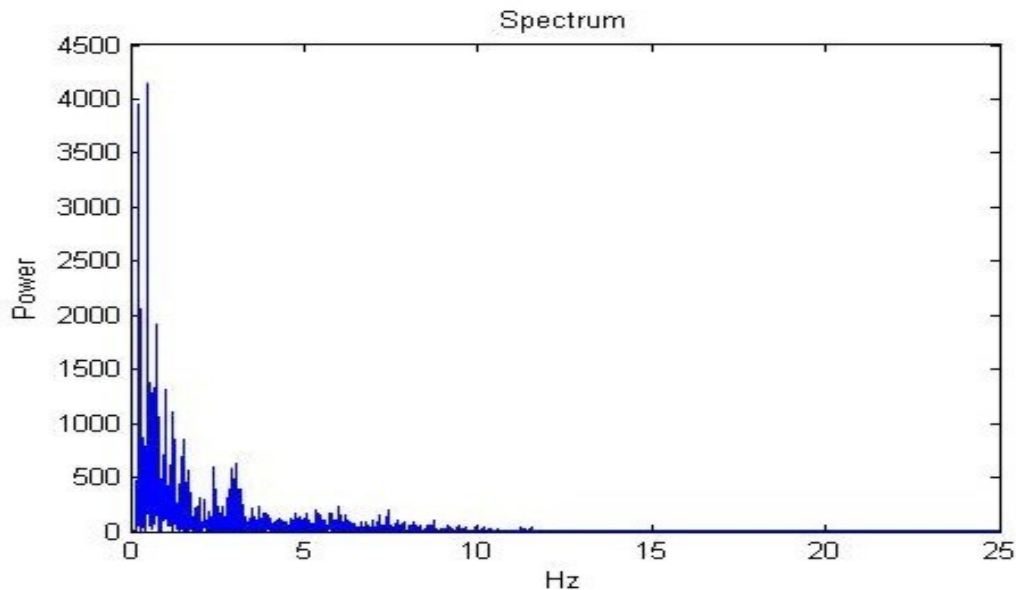
### 6.2.2 Vitality-arvon laskeminen

Kun kokeita patjalla alettiin tehdä, oli havaitun kohteen eloisuuden arviointiin käytetyn vitality-arvon mittaamiseen käytössä menetelmä, jossa teho-taajuuskoordinaatistoon oli sijoitettu mittausten perusteella saatu alue, jolla puhtaan kohinan arvot esiintyivät. Mittana eloisuudelle käytettiin saadun mittaustuloksen etäisyyttä tästä alueesta.



**Kuva 29: Kuva vanhasta vitality-arvon mittaustavasta. Kuvassa näkyy kuinka mitattu kohinakeskipiste on vaeltanut vanhalta paikaltaan ellipsin keskeltä.**

Kokeita tehtäessä havaittiin kuitenkin kohinan vaeltavan ajan mukana kyseisessä koordinaatistossa. Lisäksi signaalin spektriä tutkimalla kiinnitettiin huomiota siihen, että henkilön läsnä ollessa spektrissä teho oli erittäin voimakkaasti keskittynyt alle kahden hertsin taajuudelle myös niissä tilanteissa, joissa syke tai hengitysrytmi eivät näkyneet mittauksissa selvästi. Niinpä heräsi ajatus mittausmenetelmän muuttamisesta.



**Kuva 30: Henkilöstä mitatun elintoimintosaalain spektri.**

Uudessa menetelmässä mitattu raakasignaali suodatetaan noin kahden hertsin päästökaistalla varustetulla digitaalisella FIR suodattimella. Tällä hetkellä käytetyn suodattimen parametrit ovat seuraavat.

```
f_pass    = 2.0    # passband corner Hz
f_stop    = 3.0    # stopband corner Hz
att_stop  = 0.01   # stopband attenuation
att_pass  = 1.0    # passband attenuation
Ntap      = 57     # number of filter taps
```

Tästä suodatetusta signaalista lasketaan varianssi (teho), joka skaalataan halutulle välille. Tällä hetkellä tämä tehdään seuraavalla kaavalla.

$$\min\left(1.0, \frac{(Var - Var_{alarm})}{(Var_{max} - Var_{alarm})}\right) \quad (6.2)$$

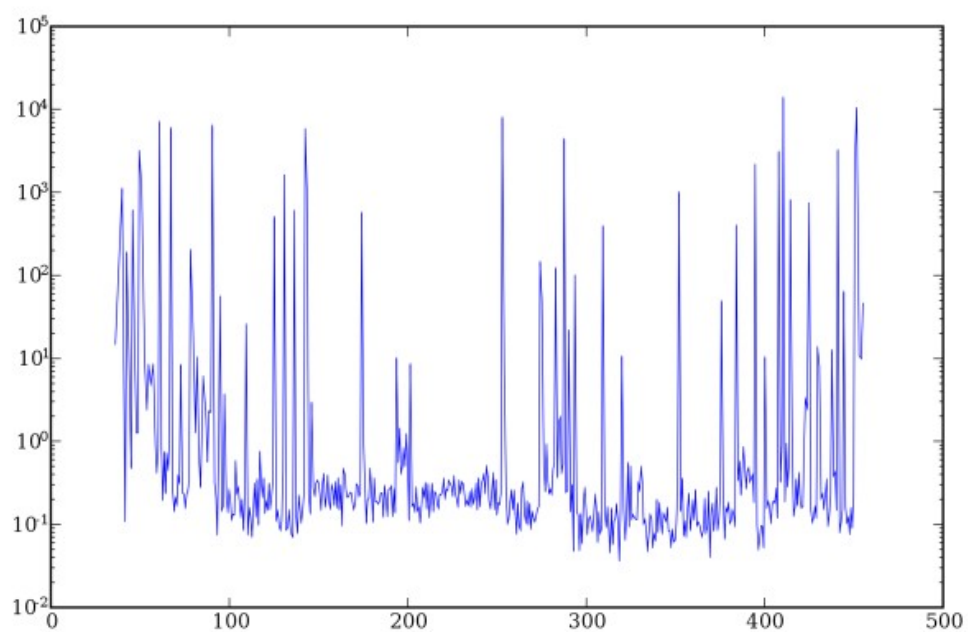
Tässä  $Var_{alarm} = 1,5$  ja  $Var_{max} = 30$

Henkilön maataessa paljaalla lattialla on saatu varianssi jopa tuhatkertainen kohinaan verrattuna. Patjalla maattaessa tulos putoaa noin dekadilla, mutta toleranssit pysyivät edelleen varsin riittävinä henkilön havaitsemiseen jopa mittauksen kannalta epäedullisissa asennoissa, kun patjaa testattiin koehuoneessa.

Elsi Technologies Oy:n suorittamassa yön yli testauksessa ilmeni kuitenkin, että henkilön nukkuessa varianssit saattavat kaikesta huolimatta pudota liian lähelle kynnysarvoa.

Kuvassa 27 yönylimittauksesta saatu järjestelmän näkemän voimakkaimman signaalin varianssi ajan funktiona. Kuvaajasta näkyy selvästi, että arvot hyvin lähellä kohinan raja-arvoa 1,5.

Tämä ongelma vaatii siis vielä jatkotutkimusta, mutta kirjoitushetkellä mittauksissa on siirretty kuvailtuun uuteen menetelmään.



**Kuva 31: Yön yli testin aikana järjestelmän löytämän vahvimman anturin vitality-arvon mitattu amplitudi ajan funktiona.**

## **7 Yhteenveto ja johtopäätökset**

### **7.1 Johtopäätökset ja tavoitteiden täyttyminen**

#### **7.1.1 Anturit**

Antureiden osalta työn tavoitteena oli ensimmäistä kertaa analysoida syvällisemmin niiden toteutusta ja soveltuvuutta käyttötarkoitukseensa. Koska erilaisia mahdollisia geometrioita on niin suuri määrä, olivat simulaatiot luonnollinen lähtökohta työlle.

Työn edetessä kävi selväksi, ettei anturin muotoa muuttamalla olisi mahdollista saada merkittävää hyötyä verrattuna nykyiseen toteutukseen. Sen sijaan anturin koon pienentäminen kohtuuden rajoissa havaittiin potentiaalisesti hyvinkin hyödylliseksi lähestymistavaksi, jolla kytkeytymistä voitaisiin parantaa. Tulokset olivat jopa yllättävän hyviä, mutta niiden kohdalla täytyy tuki muistaa tietokonesimulaation rajoittunut kyky mallintaa todellisen maailman ilmiöitä.

Anturin pienentämisellä olisi mahdollista vaikuttaa myös toiseen työn aikana ilmenneeseen ongelmaan. Tutkittaessa patja-anturin vaikutusta vitality-arvon mittaamiseen havaittiin, että sydämen sykkeen näkyminen signaalin spektrissä oli paljolti riippumaton itse kytkeytymisen voimakkuudesta. Mitä ilmeisimminkin hyvän tuloksen saavuttamiseksi anturin täytyy olla kytkeytynyt juuri oikeaan kohtaan ja suuntaan suhteessa henkilön ylävartaloon. Mikäli antureiden koko olisi pienempi, päästäisiin parempaan paikkaresoluutioon henkilön vartalon eri alueiden suhteen, jolloin todennäköisyys suotuisan kytkeytymisen syntymiseen kasvaisi vastaavasti.

Luonnollisesti antureiden pienentäminen lisäisi järjestelmän hintaa, koska esimerkiksi MUX-kortteja tarvittaisiin useampia kontrolloimaan samalle lattiapinta-alalle sijoitettua suurempaa määrää antureita. Kaikissa sovelluskohteissa saavutettava hyöty ei todennäköisesti olisi vaivan arvoista, mutta esimerkiksi Lohjan selviämishuoneen kaltaisessa paikassa muutos voisi olla arvokas apu. Sama pätee luonnollisesti kaikkiin kohteisiin, joissa ELSI-järjestelmällä katettava pinta-ala on pienehkö, ja joissa juuri elintoimintosihtialueen mittaaminen on avainasemassa asiakkaan tavoitteiden kannalta.

Voidaan sanoa, että anturianalyysin osalta alkuperäiset tavoitteet saavutettiin ja tehty tutkimus paljasti jatkossa tehtävän kehitystyön kannalta oleellista tietoa.

#### **7.1.2 RFID-toteutus**

Työssä tutkittiin myös antureiden RFID-toteutusta. Niinikään sen suhteen tultiin siihen johtopäätökseen, ettei kovin monimutkaista antennijärjestelmää ole mielekästä pyrkiä sisällyttämään anturimattoon.

Tähän on useampiakin syitä. Ensinnäkin anturimatton sijoittuminen vain kahteen dimensioon rajoittaa radikaalisti sopivien antennitoteutusten määrää. Lisäksi kahdessa dimensiossa toteutuskelpoiset monimutkaisemmat vaihtoehdot vaativat antennin eri osiin syötettävän signaalin vaiheen tarkkaa kontrollointia. Tämä ei käytännössä ole mahdollista

ELSI-anturimaton tapauksessa, jossa antureihin liitettyjä antennejä tulisi olla useita peräkkäin ja niitä syötetään maton toisesta päästä yksinkertaisilla johtimilla.

Kaikeksi onneksi simulaatioiden myötä kävi selväksi, ettei järjestelmän käytön kannalta riittävän suuntaavuuden saavuttaminen edellytä mitä suurimmalla todennäköisyydellä luopumista yksinkertaisesta silmukka-antenni-ratkaisusta.

Nostamalla käytettävää taajuutta vähentää kymmenien megahertsien tasolle on mahdollista päästä noin kolminkertaiseen suuntaavuuteen verrattuna nykytilanteeseen. Tämä yhdistettynä mahdolliseen tehotason alentamiseen voisi hyvinkin riittää pudottamaan antennin peittopinta-alan jopa metriin nykyisestä kolmesta metristä. Tämä riittäisi varmasti useimpiin ELSI-järjestelmän sovelluksiin.

Suuntaavuuden lisäksi käytetyn taajuuden lisääminen antaisi luonnollisesti myös mahdollisuuden korkeampiin modulointinopeuksiin ja merkittävästi suurempaan tiedonsiirtokapasiteettiin tunnisteiden suuntaan.

Myös RFID-toteutukseen liittyvältä osaltaan anturianalyysin tulokset palvelivat diplomityölle asetettuja tavoitteita ja tarjosivat ratkaisuvaihtoehdon yhteen järjestelmän ajankohtaisista haasteista.

### **7.1.3 Elektroniikka**

Diplomityön puitteissa toteutettiin eri elektroniikkavaihtoehtojen suorituskyvyn vertailu toistensa suhteen. Hypoteesi korkeamman herätejännitteen käytön eduista osoittautui niiden myötä oikeaksi. Saadut tulokset olivat erityisesti elintoimintosihtinaalin osalta erinomaisia. Johtuen korkeampaa herätejännitettä käyttävän kortin prototyypin rikkoutumisesta suhteellisen vähäisen testimäärän jälkeen, jäi tulosten varmentaminen ja jatkokehityksen tekeminen kuitenkin tämän diplomityön ulkopuolelle.

Niinikään vuodeanturijärjestelmän elektroniikan hyvä toimintakyky myös lattia mittauksessa oli myönteinen tulos. Koska kortin perustana olevan Analog Devicen mikrokontrollerin hinta on vain muutamia euroja, on sen mahdollinen käyttö lattiaelektroniikassa varmasti selvittämisen arvoinen asia.

Diplomityön tavoitteiden mukaisesti elektroniikkatoteutusten vertailusta saatiin siis arvokasta tietoa järjestelmän tulevaisuuden kehitystyön tarpeisiin.

### **7.1.4 Patja-anturi ja askelvaimennus**

Diplomityön tavoitteiden mukaisesti sen puitteissa etsittiin ratkaisuja myös pilotti-kohteissa esiin tulleisiin ongelmiin. Askelvaimennusmateriaalien vaikutuksen selvittelyn osalta tulokset olivat hyviä, vaikka tutkimukseen jouduttiinkin käyttämään varsin paljon aikaa. Ilmiö saatiin loppujen lopuksi esille kontrolloiduissa olosuhteissa, joskin se oli luonteeltaan hyvin satunnainen kuten osattiin odottaakin. Ongelmaan löytyi myös ratkaisu Parkolag-merkkisen askelvaimennus-materiaalin käytöllä. Tämä on epäilemättä käytännöllisempi lähestymistapa kuin ESD-kalvon asentaminen lattiatapinnoitteen alle, mikä näyttäisi olevan niinikään toimiva vaihtoehtoinen lähestymistapa.



Kokeet eri lattiamateriaaleilla tehtiin ajanjaksona jolloin ilmankosteus ei ollut kovinkaan suuri, joten tämän ilmiön vaikutusta varauksen kertymiseen ei tällä hetkellä tiedetä. Tiedot pilottikohteista viittaavat siihen, ettei ilmiötä välttämättä esiinny lainkaan suuremmilla ilmankosteuksilla. Toisaalta tämä ei poista tarvetta ilmiön eliminointiin, koska monitorointijärjestelmän on luonnollisesti toimittava luotettavasti vuoden jokaisena kuukautena.

Patjan kohdalla lähtötilanne oli se, ettei henkilöä kyetty havaitsemaan sen läpi lainkaan vitality-arvon mittaamisesta puhumattakaan. Työn lähtökohdaksi otettu sähkökentän johtaminen patjan läpi johdealueita hyväksikäyttämällä osoittautui toimivaksi ratkaisuksi ja sillä saavutettiin merkittävää edistystä. Työn sivussa saatiin myös ajatus vitality-arvon uudenlaisesta laskemistavasta mitatusta signaalista, joka on otettu käyttöön.

Patjan kehitystyö on edelleen kesken ja ongelman lopullinen ratkaisu näyttää kuitenkin vaativan lisämuutoksia joko patjaan, käytettävään ohjelmistoon tai mittauselektro-  
niikkaan.

Yhdeksi diplomityön tavoitteeksi otetun päämäärän esittää ratkaisuehdotuksia järjestelmän käytössä esiin tulleisiin ongelmiin voidaan siis katsoa täyttyneen ainakin suurimmalta osin. Tutkimuksen kohteiksi valittujen kahden ongelman osalta saatiin aikaan merkittävää edistystä ja niihin kyettiin esittämään toimiviksi havaitut ratkaisuehdotukset, vaikkakin patja-anturin osalta työtä riittääkin myös tulevaisuudessa.

## **7.2 Jatkokehitys**

### **7.2.1 Anturimatto**

Työn aikana paljastui siis useitakin tarpeita lisäkehitystyölle. Anturimaton osalta olisi varmasti hyödyllistä selvittää tarkemmin anturikoon pienentämisen vaatimukset tekniselle toteutukselle. Lisääntynyt antureiden määrä pinta-alayksikköä kohden luonnollisesti pidentäisi esimerkiksi järjestelmän tietyn alueen läpikäymiseen tarvitsemaa aikaa.

Työn aikana vahvistui myös käsitys siitä, ettei ole olemassa mitään yksittäistä ideaalista anturimaton toteutustapaa. Siksi olisikin syytä analysoida järjestelmällisesti erilaisten ELSI-järjestelmän asennuskohteiden tarpeet ja pyrkiä kehittämään muutamia erilaisia anturitoteutuksia näitä silmällä pitäen. Esimerkiksi Lohjan yksittäisen selviämishuoneen ja Kustaankartanon tapaisen suuren vanhustentalon vaatimien ominaisuuksien painopiste on varsin erilainen.

### **7.2.2 RFID-toteutus**

RFID-toteutuksen kehitystyö jatkuu edelleen laboratoriossa. Sen puitteissa olisi tämän diplomityön tulosten perusteella syytä selvittää mahdollisuus siirtyä käyttämään huomattavasti nykyistä korkeampia taajuuksia. Olennaisia tehtäviä tässä suhteessa

olisivat esimerkiksi korkeampaa taajuutta käyttävän prototyypin rakentaminen ja sen avulla tehtävä antennin kokonaissuuntaavuutta koskevien käytännön kokeiden suorittaminen. Lisäksi olisi syytä selvittää lisäisikö tämä taajuuden nosto maton johtimien säteilyä häiritsevälle tasolle, ja jos kyllä, niin ratkaisun etsiminen asiaan.

### **7.2.2 Elektroniiikka**

Työn puitteissa tehtyjen elektroniikkatoteutusten vertailujen tulokset olivat siis varsin lupaavia. Erityisesti korkeampaa herätejännitettä käyttävän kortin jatkotestit ovat oleellisessa asemassa. Tässä diplomityössä selostetut alustavat tulokset tulisi pyrkiä varmentamaan kunnollisen ja riittävän laajan koesarjan avulla. Lisäksi kokeiden tekeminen eri elektroniikkavaihtoehtojen aikaansaaman antureiden sähkökentän käyttäytymisen selvittämiseksi olisi mielenkiintoista. Kysymys siitä miten kenttä nousee lattiatasosta eri vaihtoehtoisissa jäi vielä vaille vastausta. Niinikään tehtyjen testien tekeminen myös Mummon mökin guard-toteutukselle jäi jatkotutkimuksen piiriin. Tämäkin kysymys on varsin mielenkiintoinen.

### **7.2.3 Patja-anturi**

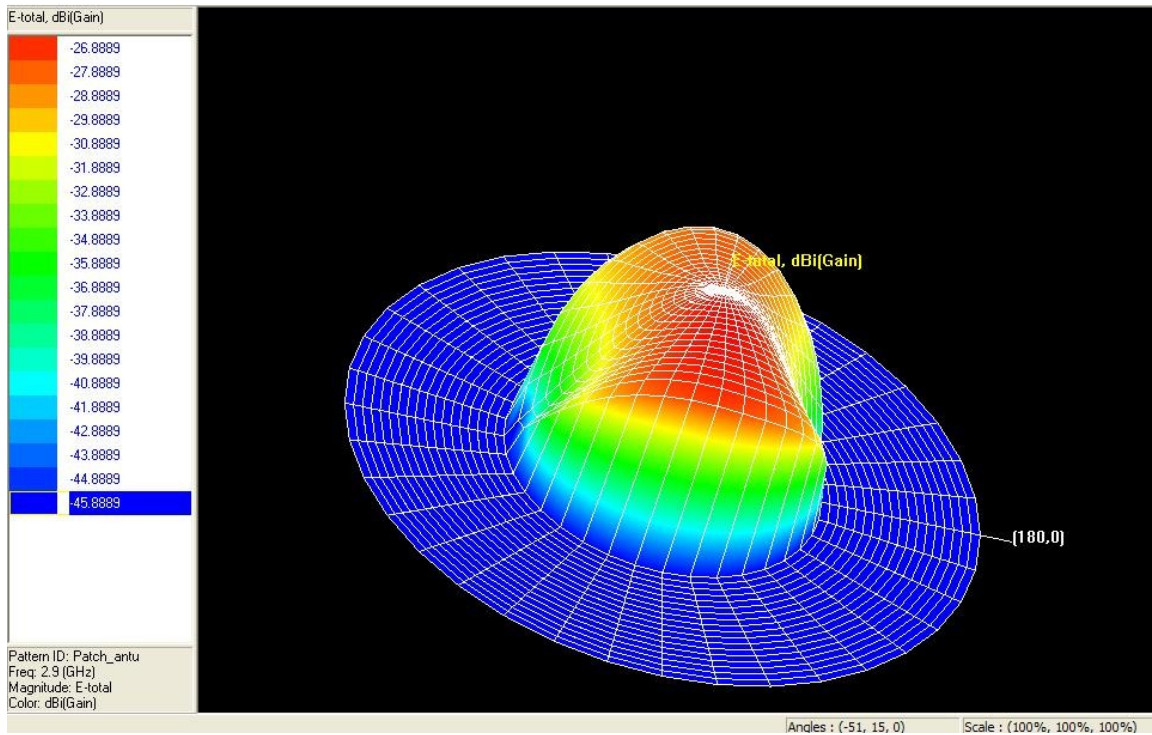
Patjan osalta ongelman lopullinen ratkaiseminen vaatii siis vielä työtä. Korkeampaa herätejännitettä käyttävän MCU-kortin mittaustulokset olivat kuitenkin niin myönteisiä, että kyseisen elektroniikkavaihtoehdon vaikutuksen testaaminen patjan läpi tehtäviin vitality-arvon mittauksiin vaikuttaisi lupaavalta lähestymistavalta. Myös itse patjan johdealueiden tutkimisessa riittää vielä tehtävää.

## Lähdeluettelo

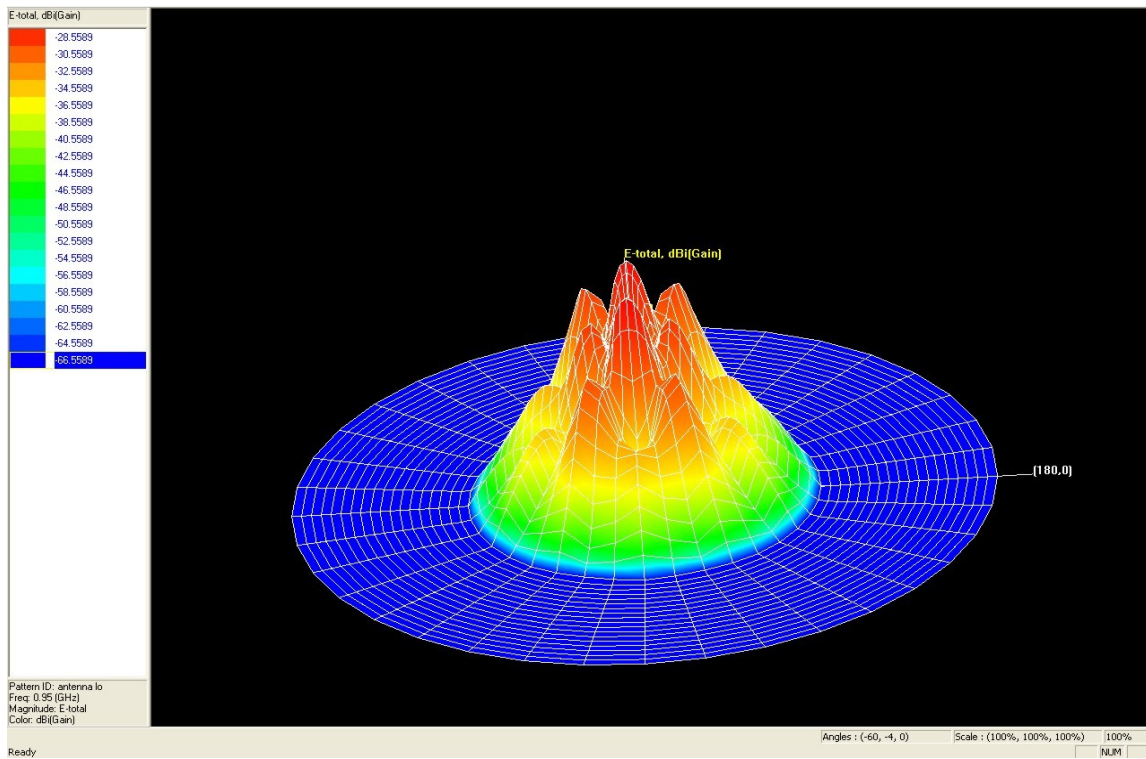
1. Tilastokeskus. Väestöennuste 2007 – 2040. 2007.
2. ELSI-Palvelualusta. Raimo Sepponen, Elsi Technologies Oy  
[http://www.tietoyhteiskuntaohjelma.fi/parhaatkaytannot/sahkoinen\\_liiketoiminta/fi\\_FI/1150447176560/](http://www.tietoyhteiskuntaohjelma.fi/parhaatkaytannot/sahkoinen_liiketoiminta/fi_FI/1150447176560/). 28.9.2007.
3. Ekahau Positioning Engine 4.0. Ekahau Positioning Engine Datasheet. Version 1.0. Helsinki: Ekahau, Inc. 2006.
4. Tuotekuvaus. WWW: <http://www.emfit.com/>. Vaajakoski: Emfit Ltd. 6/2007
5. Elsi Technologies Oy. <http://www.elsitechnologies.com/>
6. Böckelman, Thomas. Tekniska Hjälpmedel – ökad trygghet för hemmaboende äldre personer. Espoo: Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorio. 2006.
7. Siivola, Kirsi. Paikannus- ja tunnistusteknologioiden hyödyntäminen tulevaisuuden sairaalassa. Espoo: Teknillisen korkeakoulun sovelletun elektroniikan laboratorio 2007.
8. Ihannesairaala. Tekes.  
<http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/FinnWell/fi/system/projekti.html?id=8945635&nav=Projekti>. 28.9.2007
9. Lehikonen, Panu. Kuvapuhelinjärjestelmä vanhusten ja vammaisten kotona asumisen tukena. Diplomityö. Espoo: Teknillisen korkeakoulun Tietotekniikan osasto. 1995.
10. Rimminen, Henry. Kapasitiivisen anturin elektroniikka. Espoo: Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorio. 2006.
11. Westling, Lauri. ELSI-järjestelmän ohjausyksikkö. Espoo: Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorio. 2005.
12. Ropponen, Antti. Henkilön paikantamiseen ja tunnistamiseen soveltuva LF-järjestelmä. Espoo: Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorio 2007.
13. Kuuramaa, Tuukka. Kapasitiivinen vuodeanturijärjestelmä. Espoo: Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorio 2007.
14. AD7142 Programmable Controller for Capacitance Touch Sensors. Datasheet. Analog Device Inc. 2007.

15. Ropponen, Antti. Henkilön paikantamiseen ja tunnistamiseen soveltuva LF-järjestelmä. Espoo: Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorio 2007. s.60.
16. Tuotekuvaukset. <http://www.zeland.com>. Zeland Software Inc. 2007. 28.9.2007.
17. Voutilainen, Jukka. Methods and instrumentation for measuring moisture in building structures. Sarja B: Tutkimusraportteja B17. Espoo: Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorio, 2005. s 61
18. Antti Räisänen, Arto Lehto. Radiotekniikan perusteet. 11. uudistettu painos. s. 83.
19. Finkenzeller, Klaus. RFID Handbook Second edition. 2003. s. 161.
20. Öörni, Risto. AINO-julkaisuja 5/2005. s. 17.
21. Öörni, Risto. AINO-julkaisuja 5/2005. s. 18-23.
22. Antti Räisänen; Arto Lehto. Radiotekniikan perusteet. 11. uudistettu painos. s. 171.
23. Lindell, Ismo; Nikoskinen Keijo. Antenniteoria. Hakapaino Oy, Helsinki 1995. Kolmas painos. s. 23.
24. Kraus, John D. Antennas for All Applications third edition. s. 205.
25. Koskinen, Ilpo. Mummon mökki. Sisäpiiri. TKK/S Alumni-lehti.1/2005. Espoo: 2005. s. 4 – 7.
26. Kraus, John D. Antennas for All Applications third edition. s. 322-324.

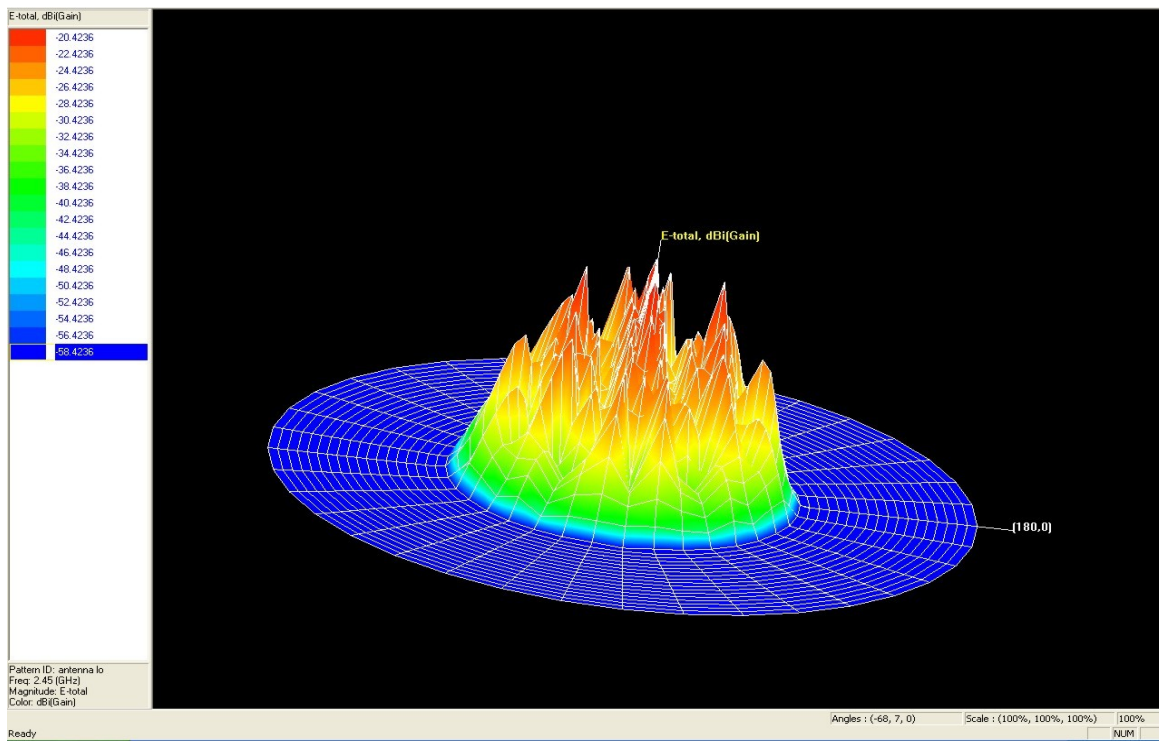
## Liitteet



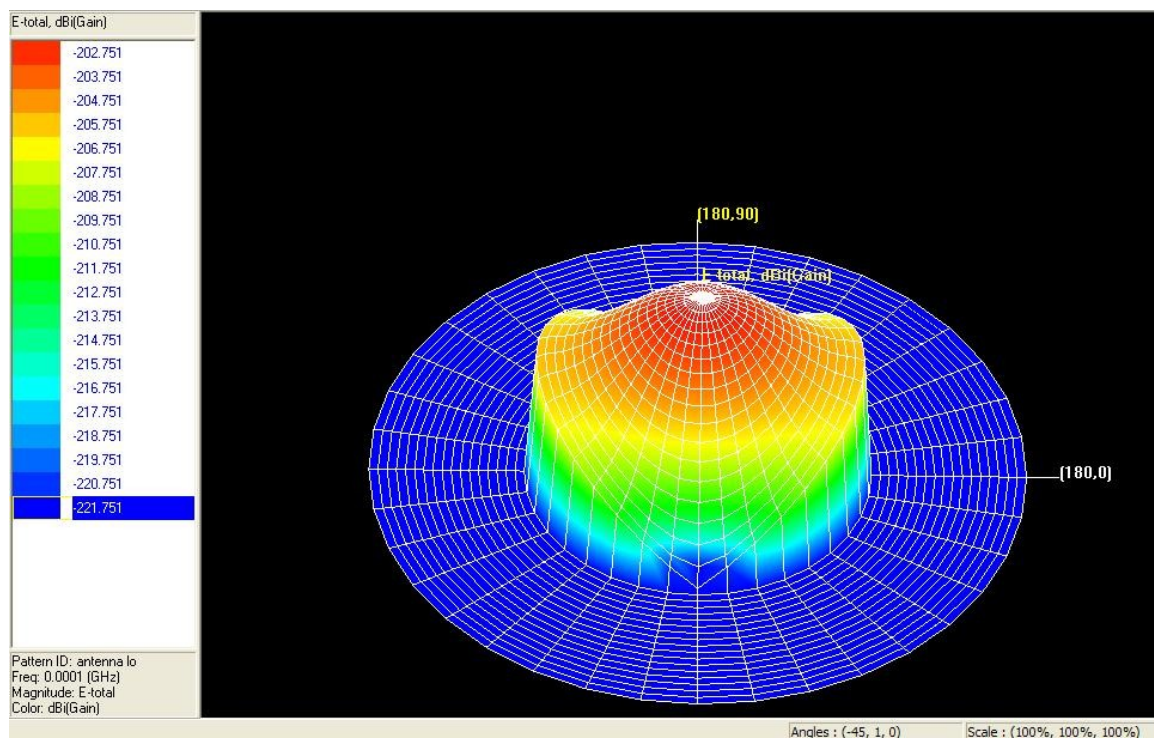
Kuva 32: Patch-antennin sähkökenttä 434 MHz taajuudella



**Kuva 33: 48cmx44cm-(silmukka)antennin sähkökenttä 0,95 GHz taajuudella**



**Kuva 34: 48cmx44cm-(silmukka)antennin sähkökenttä 2,45 GHz taajuudella**



**Kuva 35:48cmx44-(silmukka)antennin sähkökenttä 100 kHz taajuudella**